

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**JAN BUCIOR**

**KSZTAŁTOWANIE TRWAŁOŚCI I NIEZAWODNOŚCI  
WYBRANYCH ELEMENTÓW MASZYN  
W PROCESACH OBRÓBKI POWIERZCHNIOWEJ**

**MECHANIKA**

**Z. 87  
GLIWICE  
1987**



**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**ZESZYTY NAUKOWE**

**Nr 1013**

**JAN BUCIOR**

**KSZTAŁTOWANIE TRWAŁOŚCI  
I NIEZAWODNOŚCI  
WYBRANYCH ELEMENTÓW MASZYN  
W PROCESACH  
OBRÓBKI POWIERZCHNIOWEJ**

**G L I W I C E**

**1 9 8 7**

## OPINIODAWCY

Prof. dr inż. Kazimierz Oczos

Prof. dr hab. inż. Janusz Oprzędkiewicz

## KOLEGIUM REDAKCYJNE

- REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Wiesław Gabzdyl  
REDAKTOR DZIAŁU — Prof. dr hab. inż. Józef Wojnarowski  
SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Stinzing  
CZŁONKOWIE KOLEGIUM — Prof. dr hab. inż. Adolf Maciejny  
— Prof. dr inż. Stanisław Malzacher  
— Prof. dr hab. inż. Bronisław Skinderowicz

## OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Mgr Aleksandra Kłobuszowska

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0434-0877

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej  
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

---

Nakł. 160+85 Ark. wyd. 8,784 Ark. druk. 8,375 Papier offset. kl. III 70x100, 70 g  
Oddano do druku 3.04.87 Podpis. do druku 13.05.87 Druk ukończ. w maju 1987  
Zam. 295/87 L-24 Cena zł 176,—

---

Skład, fotokopie, druk i oprawę  
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

## SPIS TREŚCI

	Str.
1. WPROWADZENIE.....	9
2. ANALIZA ZAGADNIENIA Z UWZGLĘDNIENIEM DOTYCHCZASOWEGO STANU BADAN	11
2.1. Charakterystyka warstwy wierzchniej ukonstytuowanej w procesach obróbki powierzchniowej.....	11
2.1.1. Stan warstwy wierzchniej po obróbce powierzchniowej.	11
2.1.2. Właściwości użytkowe warstwy wierzchniej po obróbce powierzchniowej.....	19
2.2. Analiza czynnikowa tworzenia trwałości i niezawodności elementów maszyn.....	25
2.3. Ocena dotychczasowego stanu badań i sformułowanie tez pracy	31
3. PROGRAM I METODY BADAŃ.....	34
4. MODELOWANIE WPLYWU OBRÓBKĄ POWIERZCHNIOWEJ NA STAN I WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE WARSTWY WIERZCHNIEJ METODĄ ANALIZY WYMIAROWEJ.....	36
4.1. Identyfikacja wpływu procesów obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe warstwy wierzchniej.....	36
4.2. Zbiory parametrów technologicznych obróbki powierzchniowej	37
4.3. Modele parametrów warstwy wierzchniej po obróbce powierzchniowej w postaci układów iloczynów bezwymiarowych.....	43
5. MODELE MATEMATYCZNE WPLYWU PARAMETRÓW WARSTWY WIERZCHNIEJ NA TRWAŁOŚĆ I NIEZAWODNOŚĆ ELEMENTÓW MASZYN.....	53
5.1. Ogólne związki trwałości i niezawodności elementów maszyn z parametrami warstwy wierzchniej.....	53
5.2. Trwałość i niezawodność elementów maszyn bez uwzględnienia zużycia korozyjnego.....	56
5.2.1. Praca elementów maszyn w warunkach obciążenia ustabilizowanego.....	57
5.2.2. Praca elementów maszyn w warunkach obciążenia nieustabilizowanego.....	61
5.3. Trwałość i niezawodność elementów maszyn i uwzględnieniem zużycia korozyjnego.....	67
5.4. Prognozowanie trwałości i niezawodności elementów maszyn na podstawie mechaniki pękania.....	70
6. EKSPERYMENTALNE BADANIA WŁASNE.....	81
6.1. Wpływ procesów szlifowania i kulgowania strumieniowego kulkami szklanymi na wybrane parametry stanu warstwy wierzchniej.....	81

	Str.
6.2. Modelowanie wpływu parametrów kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi na naprężenia własne warstwy wierzchniej materiału EJ736 metodą wyboru bazy wymiarowej.....	86
6.3. Modelowanie wpływu kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi na stan warstwy wierzchniej w warunkach zmieniającej się w czasie charakterystyki procesu.....	91
6.3.1. Sprawdzenie hipotezy zmienności w czasie procesu kulkowania w przypadku badania naprężeń własnych i chropowatości powierzchni warstwy wierzchniej	92
6.3.2. Wpływ kulkowania strumieniowego na naprężenia własne i chropowatość powierzchni warstwy wierzchniej w warunkach zmieniającej się charakterystyki procesu.....	94
6.4. Wpływ obróbki powierzchniowej na odporność korozyjną wybranych materiałów konstrukcyjnych.....	98
6.5. Wpływ wybranych sposobów obróbki powierzchniowej na trwałość i niezawodność elementów maszyn.....	104
6.6. Zastosowanie bayesowskiej teorii decyzji do wyboru obróbki powierzchniowej łopatek sprężarki silnika turbospalinowego.....	109
7. WNIOSKI.....	123
LITERATURA.....	125
STRESZCZENIE.....	131
PEŠNME.....	132
SUMMARY.....	133

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. ВВЕДЕНИЕ.....	9
2. АНАЛИЗ ВОПРОСА С ОСОБЫМ УЧЁТОМ ПОЛУЧЕННЫХ ДО СИХ ПОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
2.1. Характеристика поверхностного слоя образованного во время процессов поверхностной обработки.....	11
2.1.1. Состояние поверхностного слоя после поверхностной обработки.....	11
2.1.2. Эксплуатационные качества поверхностного слоя после поверхностной обработки.....	19
2.2. Факторный анализ формирования долговечности и надёжности деталей машин.....	25
2.3. Оценка полученных до сих пор результатов исследований и формулировка тезисов работы.....	31
3. ПРОГРАММА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	34
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТОДОМ АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТИ.....	36
4.1. Идентификация влияния процесса поверхностной обработки на состояние и эксплуатационные качества поверхностного слоя....	36
4.2. Множества технологических параметров поверхностной обработки	37
4.3. Модели параметров поверхностного слоя после поверхностной обработки.....	43
5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	53
5.1. Общие связи долговечности и надёжности деталей машин с параметрами поверхностного слоя.....	53
5.2. Долговечность и надёжность деталей машин без учёта коррозионного износа.....	56
5.2.1. Работа деталей машин в условиях устойчивой нагрузки...	57
5.2.2. Работа деталей машин в условиях неустойчивой нагрузки	61
5.3. Долговечность и надёжность деталей машин с учётом коррозионного износа.....	67
5.4. Прогноз долговечности и надёжности деталей машин на основании механики растрескивания.....	70
6. СОБСТВЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	81

	Стр.
6.1. Влияние процессов шлифования и дробеструйной обработки стеклянными шариками на избранные параметры состояния поверхностного слоя.....	81
6.2. Моделирование влияния дробеструйной обработки стеклянными шариками на остаточные напряжения поверхностного слоя материала ЗИ736 методом выбора размерности базы.....	86
6.3. Моделирование влияния дробеструйной обработки стеклянными шариками на состояние поверхностного слоя в условиях изменяющейся характеристики процесса.....	91
6.3.1. Проверка гипотезы изменчивости во время дробеструйной обработки в случае исследования остаточных напряжений и шероховатости поверхности поверхностного слоя.....	92
6.3.2. Влияние дробеструйной обработки на остаточные напряжения и шероховатость поверхности поверхностного слоя в условиях изменяющейся характеристики процесса.....	94
6.4. Влияние поверхностной обработки на стойкость против коррозии избранных конструктивных материалов.....	98
6.5. Влияние избранных способов поверхностной обработки на долговечность и надёжность деталей машин.....	104
6.6. Применение байесовской теории решений к выбору поверхностной обработки лопаток газотурбинного двигателя.....	109
7. ВЫВОДЫ.....	123
ЛИТЕРАТУРА.....	125
РЕЗЮМЕ.....	132



## CONTENTS

	Page
1. INTRODUCTION.....	9
2. ANALYSIS OF PROBLEM IN CONSIDERATION OF FORMER RESEARCH WORKS...	11
2.1. Characteristics of Surface Layer Constituted during Surface Treatment Processes.....	11
2.1.1. Surface Layer Condition after Surface Treatment.....	11
2.1.2. Surface Layer Useful Properties after Surface Treatment.....	19
2.2. Factor Analysis of Creation of Durability and Reliability of Machine Elements.....	25
2.3. Assessment of Present State of Research and Presentation of Work Theses.....	31
3. RESEARCH PROGRAM AND METHODS.....	34
4. MODELLING OF EFFECT OF SURFACE TREATMENT ON CONDITION AND USEFUL PROPERTIES OF SURFACE LAYER USING DIMENSIONAL ANALYSIS METHOD...	36
4.1. Identification of Effect of Surface Treatment Processes on Condition and Useful Properties of Surface Layer.....	36
4.2. Sets of Surface Treatment Processing Parameters.....	37
4.3. Models of Surface Layer Parameters after Surface Treatment in Form of Dimensionless Product Systemes.....	43
5. MATHEMATICAL ARCHETYPES OF EFFECT OF SURFACE LAYER PARAMETERS ON DURABILITY AND RELIABILITY OF MACHINE ELEMENTS.....	53
5.1. General Relations of Machine Elements Durability and Reliability with Surface Layer Parameters.....	53
5.2. Durability and Reliability of Machine Elements without Consideration of Corrosive Wear.....	56
5.2.1. Operation of Machine Elements under Stabilized Load Conditions.....	57
5.2.2. Operation of Machine Elements under Transient Load Conditions.....	61
5.3. Durability and Reliability of Machine Elements in Consideration of Corrosive Wear.....	67
5.4. Forecasting of Machine Element Durability and Reliability on the Grounds of Cracking Mechanics.....	70
6. AUTHOR'S OWN EXPERIMENTAL RESEARCH.....	81
6.1. Effect of Grinding and Glass Bead Peening Processes on some Selected Parameters of Surface Layer Condition.....	81

	Page
6.2. Modelling of Effect of Glass Bead Peening Parameters on Residual Stresses in Surface Layer of EJ736 Material using Reference Line Selection Method.....	86
6.3. Modelling of Effect of Glass Bead Peening Process on Surface Layer Condition under Circumstances of Process Characteristics Varying in Time.....	91
6.3.1. Verification of Hypothesis concerning Variableness in Time of Peening Process in case of Investigation of Surface Layer Residual Stresses and Roughness...	92
6.3.2. Effect of Glass Bead Peening Process on Surface Layer Residual Stresses and Roughness under Circumstances of Variable Process Characteristics.....	94
6.4. Effect of Surface Treatment on Corrosion Resistance of some Selected Construction Materials.....	98
6.5. Effect of Selected Surface Treatment Methods on Durability and Reliability of Machine Elements.....	104
6.6. Application of Bayes Theory of Decisions for Selection of Surface Treatment Method for Turbine Engine Compressor Blades and Vanes.....	109
7. CONCLUSIONS.....	123
BIBLIOGRAPHY.....	125
SUMMARY.....	132

## 1. WPROWADZENIE

Przez długi okres za główny kierunek poprawy trwałości i niezawodności elementów maszyn uważano udoskonalenie ich konstrukcji oraz stosowanie na nie materiałów o coraz lepszych właściwościach fizyczno-chemicznych, nie zwracając należytej uwagi na techniki wytwarzania. W miarę rozwoju badań w dziedzinie fizyki uszkodzeń okazało się, że znaczny wpływ na trwałość i niezawodność elementów maszyn ma proces technologiczny, rodzaj stosowanych metod i sposobów obróbki, a nawet kolejność ich zastosowania w procesie wytwarzania. Niewątpliwie największą rolę odgrywa tu obróbka powierzchniowa, kształtująca ostateczny stan warstwy wierzchniej (WW).

Powodem, który skłania teoretyków i praktyków do zainteresowania się WW elementów maszyn jest fakt, że to ona decyduje o najważniejszych właściwościach użytkowych, takich jak odporność na zużycie adhezyjne, ściernie, korozyjne, zmęczeniowe i inne. W pracy [35] stwierdzono, że w 85% o zużyciu elementów maszyn decydują właściwości stereometryczne i fizyczno-chemiczne WW.

Zapewnienie wymaganej trwałości i niezawodności elementów maszyn na etapie ich wytwarzania w obecnej chwili jest najważniejszym problemem w całym procesie powstawania elementu. Nawet najlepiej opracowany element pod względem konstrukcyjnym, nierzadko w procesie wytwarzania na skutek złej organizacji i zastosowanej niewłaściwej technologii traci większość przewidzianych cech niezawodności. Pociąga to z kolei wzrost kosztów wytwarzania i konieczność dodatkowego produkowania dużej liczby elementów zapasowych, ponoszenia dodatkowych kosztów z tytułu napraw reklamacyjnych elementów, powoduje niewspółmierne powiększanie kosztów eksploatacyjnych danego urządzenia.

W pracy [45] wykazano, że w ZSRR 60-70% uszkodzeń maszyn wynikało wyłącznie z winy stosowania niewłaściwych procesów technologicznych. Z kolei przez stosowanie racjonalnych metod i warunków obróbki zwiększono trwałość wytwarzanych maszyn o 15-20% [99]. Na skutek małej niezawodności elementów w trakcie eksploatacji ponoszone są straty będące nawet wielokrotnością wartości nowego urządzenia. W przypadku samochodów ponosi się straty dochodzące do sześciokrotnej ich wartości, dla samolotów wskaźnik ten dochodzi do 5, dla obrabiarek do 8, dla aparatury do 7. Wskutek nadmiernej korozji traci się do 10% globalnej ilości produkowanych metali [81].

Konieczność zapewnienia właściwej trwałości i niezawodności występuje w całym przemyśle maszynowym. Jednak największą uwagę powinno się zwracać na te elementy, które w czasie eksploatacji pracują w warunkach obciążen

zmiennych i narażone są na zużycie ścierne, erozyjne i korozyjne. Tak niekorzystne działanie czynników wymuszających stwarza szczególnie trudności w zapewnieniu tym elementom wymaganej trwałości i niezawodności.

W obecnej chwili pilną koniecznością staje się opracowanie związków ilościowych warunków obróbki ze stanem WW, jej właściwościami użytkowymi, trwałością i niezawodnością elementów. Jest to przedsięwzięcie na pewno trudne, ale i nieodzowne przy obecnym stanie techniki światowej.

## 2. ANALIZA ZAGADNIENIA Z UWZGLĘDNIENIEM DOTYCHCZASOWEGO STANU BADAN

### 2.1. Charakterystyka warstwy wierzchniej ukonstytuowanej w procesach obróbki powierzchniowej

Analizując literaturę związaną z wpływem obróbki powierzchniowej na ukonstytuowaną WW zauważa się traktowanie problemu wycinkowo, bez szerszego spojrzenia na wzajemne oddziaływanie wszystkich parametrów technologicznych wchodzących w skład zbioru adekwatnego dla danego sposobu obróbki. Takie podejście do problemu oraz niedoskonałość metod pomiarowych są w poważnym stopniu powodem występujących dużych rozbieżności w podawanych wartościach wyników badań. Stąd też można wiązać duże nadzieje z nowym ujęciem identyfikacji stanu WW. Mianowicie w pracy [29] podjęto próbę określania wpływu procesu technologicznego na konstytuowanie WW elementów maszyny za pomocą energii zmagazynowanej w metalu. Podczas obróbki metalu część dostarczonej energii mechanicznej wydziela się w postaci ciepła, reszta zaś pozostaje w metalu powodując wzrost jego energii wewnętrznej. Tę część energii właśnie nazwano energią zmagazynowaną. Ustalenie odpowiednich zależności pomiędzy parametrami technologicznymi sposobów obróbki powierzchniowej a zmianami energii zmagazynowanej może znacznie ułatwić opisywanie stanu WW, bez uciekania się do pracochłonnych, dotychczas stosowanych metod pomiaru jej parametrów.

#### 2.1.1. Stan warstwy wierzchniej po obróbce powierzchniowej

Obróbka powierzchniowa ścierna jest typowym przykładem procesu o charakterze stochastycznym, co uniemożliwia w poważnym stopniu podanie typowej charakterystyki WW, utworzonej w poszczególnych procesach obróbki.

Dotychczasowy stan wiedzy wykazuje, że w procesie szlifowania na kształtowanie WW w istotny sposób wpływa ciepło wywiązujące się podczas obróbki. Istotna jest tu ilość ciepła przechodząca do przedmiotu obrabianego. W zależności od parametrów szlifowania oraz właściwości układu O-P-N-U do rozważań przyjmuje się, że od 65-85% całej wytworzonej ilości ciepła przy szlifowaniu przechodzi w materiał [23, 42, 44, 79, 97]. Ta ilość ciepła jest przyczyną powstania pola temperatur w WW w czasie obróbki. Wartość temperatury, jej rozkład oraz czas działania decydują o następujących zjawiskach:

- powstanie przemian fazowych w WW,

- zmiany własności fizycznych,
- zjawiska fizyczno-chemiczne na granicy metal - ośrodek,
- powstawanie pola naprężeń.

Analizując ewentualny wpływ temperatury na zmiany strukturalne WW w procesie szlifowania należy pamiętać, że mimo wysokiej jej wartości 1770 K i więcej [40], czas działania maksymalnej temperatury na materiał obrabiany jest bardzo krótki z punktu widzenia możliwości zaistnienia przemian fazowych i strukturalnych [43]. Dodatkowym czynnikiem, który należy brać pod uwagę, jest wysokie ciśnienie w strefie skrawania.

W bilansie cieplnym szlifowania oraz rozkładzie pola temperatur bardzo istotną rolę spełnia gęstość jednostkowego strumienia ciepła działającego na powierzchnię, którą warunkuje wartość rzeczywistej powierzchni skrawania [42, 97].

Istnieją obecnie opracowane modele wpływu parametrów szlifowania na wartość maksymalnych temperatur w WW [23, 79, 117]. Poznanie ilościowe tych zależności wraz ze znajomością wpływu temperatury na tworzenie WW ułatwi sterowanie parametrami szlifowania w czasie trwania procesu obróbki, w aspekcie konstytuowania żądanej WW. Ponieważ na stan WW po szlifowaniu wpływa bardzo dużo czynników, więc ściśle określenie skutków procesu dotychczas nie jest możliwe i mimo że przytoczone wartości liczbowe podane są w szerokich granicach, to jednak w poszczególnych przypadkach mogą być przekraczane.

Topografia naprężeń własnych w WW utworzonej w procesie szlifowania charakteryzuje się występowaniem naprężeń rozciągających, o maksymalnej wartości dochodzącej do 1000 MPa, a ich głębokość zalegania może przekraczać nawet 150  $\mu\text{m}$ . Niekiedy, w przypadku występowania mniejszych wartości maksymalnych naprężeń rozciągających, bezpośrednio pod powierzchnią mogą zalegać na niewielkich głębokościach naprężenia ściskające. Mogą one być spowodowane odkształceniem plastycznym WW w wyniku mechanicznego oddziaływania ziarn ściernicy (wpływ sił skrawania) [55,79] lub też są wynikowymi naprężeniami, powstałymi z nałożenia się pola naprężeń od szlifowania z naprężeniami od procesów obróbki poprzedzającej go.

Zmiany mikrotwardości WW w wyniku szlifowania związane są również z ilością ciepła wydzielającego się podczas procesu obróbki. W zależności od charakterystyki ściernicy i warunków szlifowania, składu chemicznego stali i rodzaju obróbki cieplnej poprzedzającej szlifowanie mogą zajść następujące przypadki:

- proces szlifowania prowadzony jest bez zmian strukturalnych w WW,
- temperatura w WW nie przekracza temperatury początku tworzenia się austenitu,
- temperatura w WW wzrasta powyżej temperatury początku tworzenia się austenitu.

W pierwszym przypadku twardość strefy WW leżącej najbliższej powierzchni może być wyższa od twardości rdzenia materiału. Wzrost umocnienia WW należy tłumaczyć zgniotem lub też przemianą austenitu szczątkowego. W drugim natomiast przypadku może nastąpić obniżenie twardości WW w stosunku do rdzenia materiału, na skutek rekrytalizacji materiału w stanie zgniecionym. Proces ten może prowadzić również do rozdrobnienia ziarn. W przypadku szlifowania stali uprzednio zahartowanej obniżenie twardości wiąże się z odpuszczeniem materiału. Trzeci przypadek powoduje zwykle duży przyrost twardości WW, na skutek przemiany martenzytycznej austenitu.

Szczególnie niekorzystny jest przypadek trzeci. Obecność naprężeń własnych rozciągających w WW o dużej wartości i dużym gradientie może powodować powstanie mikropęknięć lub też łuszczenie WW.

Głębokość umocnionej WW po szlifowaniu zawarta jest w zakresie od 0,01 - 0,16 mm. Natomiast minimalna wysokość chropowatości powierzchni może wynosić  $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ .

Wpływ, poznanych w dostatecznym stopniu, parametrów związanych z procesem szlifowania na tworzenie stanu WW jest następujący. Ze wzrostem prędkości i głębokości szlifowania naprężenia rozciągające w WW wzrastają. Decydujący jednak jest tu wpływ głębokości, szczególnie w zakresie małych głębokości szlifowania, gdzie obserwuje się zużycie ściernicy w formie ścierania, a nie wykruszania ziarn. Wpływ prędkości skrawania jest mały i zależy w dużym stopniu od sposobu obciążania ściernicy. Według niektórych autorów [23, 114, 118] wzrost prędkości szlifowania obniża nawet naprężenia rozciągające w wyniku zmniejszania średniej temperatury stykowej. Wzrost natomiast prędkości przedmiotu obrabianego, posuwu lub posuwu wzdłużnego przy szlifowaniu płaszczyzn prowadzi do obniżenia wartości naprężeń rozciągających. Z kolei naprężenia rozciągające w WW zwiększają się wraz ze zmniejszeniem rozmiaru ziarn i zwiększeniem twardości ściernicy. Bardzo korzystny rozkład naprężeń w WW otrzymuje się podczas szlifowania ściernicami wielkoporowymi [48, 114]. Naprężenia rozciągające można również zmniejszyć w poważnym stopniu przez stosowanie właściwych cieczy chłodząco-smarujących. Duży wpływ na powstanie pola naprężeń i umocnienia WW ma rodzaj obrabianego materiału, jego struktura, skład chemiczny, właściwości mechaniczne i fizyczne.

Wzrost rozmiarów ziarn ściernicy powoduje pogorszenie chropowatości obrabianej powierzchni. Twardość ściernicy natomiast wpływa na chropowatość w ten sposób, że zarówno jej większa wartość, jak i mniejsza od optymalnej dla danego materiału, powodują zwiększenie chropowatości [48]. Zmniejszenie prędkości szlifowania wpływa na zwiększenie chropowatości, natomiast zmniejszenie prędkości przedmiotu obrabianego zmniejsza chropowatość powierzchni. Chropowatość obrabianej powierzchni również zwiększa się ze wzrostem posuwu i głębokości szlifowania. Można ją zmniejszyć również przez stosowanie właściwej cieczy chłodząco-smarującej. Duży wpływ na chropowatość powierzchni ma sztywność układu O-P-N-U.

Należy też pamiętać o wpływie na rozkład pola naprężeń, mikrotwardości i na chropowatość powierzchni pozostałych parametrów charakteryzujących ściernicę [48].

Analizując obróbkę ścierną w aspekcie konstytuowania WW należy również podkreślić rolę zabiegów wyiskrzania. Czas wyiskrzania albo liczba przejść wyiskrzających jest jednym z najistotniejszych czynników decydujących o ostatecznym stanie WW. Podczas tego zabiegu następuje znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni, zwiększa się zgniot i obniżają się naprężenia rozciągające w WW. Duży wpływ na ukonstytuowany stan WW po szlifowaniu ma też stan roboczej powierzchni ściernicy, uwarunkowany zarówno sposobem, jak i częstością jej obciążania [62,77,79,88,90]. Na ogół ściernice obciążane z dużym posuwem obciążania gwarantują ich dobrą skrawność, zapewniają WW z obecnością naprężeń ściskających lub naprężeń rozciągających o małych wartościach. Ściernice natomiast obciążane z małym posuwem obciążania zapewniają małą chropowatość obrabianej powierzchni.

W dalszym ciągu mało opracowań poświęconych jest poznaniu wpływu parametrów technologicznych szlifowania na tworzenie innych wyszcząglnianych cech stanu WW [27].

Inne sposoby obróbki powierzchniowej o kinematyce kierowanej, jak np. gładzenie, kształtują pole naprężeń własnych w WW według modelu mechanicznego. Naprężenia ściskające zawierają się w zakresie 200-400 MPa w warunkach mikroskrawania i w zakresie 700-900 MPa w warunkach wygładzania. Głębokość zalegania naprężeń jest zawarta w granicach 5-30  $\mu\text{m}$ , przy czym największe wartości naprężeń występują w warstwie podpowierzchniowej na głębokości kilku mikrometrów [108, 124]. Topografia mikrotwardości charakteryzuje się występowaniem maksymalnej wartości w strefach przypowierzchniowych. Stopień utwardzenia dochodzi do 45%. Minimalna osiągalna chropowatość powierzchni po gładzeniu może wynosić  $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ .

Wyniki badań [63] wykazały, że gładzenie doprowadza do rozdrabniania ziarn niektórych stali i zwiększa gęstość dyslokacji do 1,8 razy. Nie stwierdzono natomiast przemian fazowych w WW po gładzeniu.

Ukonstytuowany stan WW po gładzeniu zależy od twardości materiału ściernego, rozmiaru ziarn, jednostkowego nacisku powierzchniowego, lepkości cieczy, kinematyki i czasu trwania obróbki. Dobierając właściwy materiał ścierny i kinematykę procesu należy pamiętać, że wzrost nacisku powierzchniowego prowadzi do wzrostu umocnienia, naprężeń własnych i chropowatości WW. Wzrost lepkości cieczy zmniejsza chropowatość powierzchni.

Ze sposobów obróbki powierzchniowej o kinematyce swobodnej należy wymienić polerowanie i obróbkę strumieniowo-ścierną. Wymienione procesy tworzą, podobnie jak i przy gładzeniu, pole naprężeń własnych w WW według modelu mechanicznego. Zatem po polerowaniu naprężenia ściskające osiągają wartości w zakresie od 50-200 MPa i zalegają na głębokość 20  $\mu\text{m}$ . Z kolei po obróbce strumieniowo-ścierną wartości te wynoszą odpowiednio 250-800 MPa i 25  $\mu\text{m}$  [45].



Umocnienie w WW po omawianych sposobach obróbki cechuje się występowaniem maksymalnych wartości w strefach przypowierzchniowych WW. W przypadku obróbki strumieniowo-ścierniej stopień zgniotu dochodzi do 40%, a głębokość warstwy umocnionej wynosi maksymalnie 0,6 mm. Natomiast po polerowaniu wartości te należy przyjmować mniejsze o 80%. Po polerowaniu otrzymuje się powierzchnię o minimalnej chropowatości  $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ , a po obróbce strumieniowo-ścierniej  $R_a$  minimalne wynosi  $0,16 \mu\text{m}$ . O kształtowaniu stanu WW w przypadku polerowania w największym stopniu decydują: prędkość polerowania, nacisk jednostkowy, prędkość posuwu oraz rodzaj pasty polerskiej z odpowiednimi materiałami wiążącymi, mającymi konsystencję i skład ułatwiający oddziaływanie chemiczne na powierzchnię obrabianą. Zwiększając wartości pierwszych trzech parametrów zwiększa się intensywność procesu, co prowadzi do wzrostu naprężeń własnych i umocnienia WW.

Zalecane składy past w zależności od materiału obrabianego i rodzaju polerowania podano w [48].

Na konstituowanie WW w procesie obróbki strumieniowo-ścierniej w znacznym stopniu wpływa charakterystyka geometryczna strumienia, jego skład i energia [14, 49]. Charakterystyka geometryczna strumienia określona jest kątem natrysku, kątem rozwarcia strumienia i odległością dyszy od powierzchni obrabianej. Z kolei skład strumienia określany jest koncentracją, rozmiarem ziarn i rodzajem materiału proszku ściernego. Natomiast na energię strumienia ściernego wpływa masa ziarn ściernych, masa cieczy i jej ciśnienie oraz odległość dyszy od powierzchni obrabianej. Przeprowadzany proces obróbki przy małej energii strumienia i małym wymiarze ziarna ściernego oraz małym kącie natrysku zapewnia niską chropowatość powierzchni. Zwiększanie kąta natrysku i energii strumienia prowadzi do wzrostu umocnienia WW.

Silne rozwinięcie powierzchni po obróbce strumieniowo-ścierniej ułatwia przyczepność powłok galwanicznych i lakierniczych. Powierzchnia ta ma również właściwości kapilarne.

Śród stosowanych sposobów obróbki nagniataniem do rozważań wybrano sposoby najbardziej reprezentatywne. Jako nagniatanie statyczne rozpatrzono kulkowanie naporowe, ze sposobów zaś nagniatania dynamicznego uwzględniono kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi.

Przedstawione sposoby obróbki konstituują WW według modelu mechanicznego. Wynikające różnice w wartościach parametrów stanu WW zależą głównie od intensywności danego sposobu obróbki. Należy też pamiętać i o tym, że każdemu przedstawionemu sposobowi obróbki w czasie kształtowania się WW towarzyszą zjawiska cieplne - największe podczas nagniatania tocznego, najmniejsze w trakcie kulkowania strumieniowego i zależą one w poważnym stopniu od stanu materiału obrabianego elementu.

Pole naprężeń własnych po kulkowaniu naporowym charakteryzuje się występowaniem maksymalnych naprężeń ściskających o wartości do 1300 MPa i głębokości załęganie do 5 mm. Głębokość utwardzenia osiąga nawet 2,5 mm,

a największe wartości występują w strefach przypowierzchniowych [95]. Nagniatanie mechaniczne zapewnia uzyskanie chropowatości o  $R_a = 0,04 \div 0,16 \mu\text{m}$ .

Wpływ poszczególnych parametrów nagniatania na konstytuowanie WW jest różny. Największy wpływ mają siła nacisku i średnica kulki, prędkość nagniatania i posuw. Wzrost siły nacisku prowadzi na ogół do powiększenia głębokości zalegania i wzrostu maksymalnej wartości naprężeń. Z kolei zwiększanie średnicy kulki zwiększa głębokość zalegania naprężeń i zmniejsza nieco maksymalną ich wartość. Pozostałe parametry kulkowania naporowego decydują w mniejszym stopniu o konstytuowaniu pola naprężeń i zgniotu. Na ogół zwiększanie posuwu i prędkości nagniatania ponad optymalne wartości prowadzi do obniżania się maksymalnych wartości naprężeń.

Podstawowym parametrem technologicznym kulkowania naporowego, od którego zależy chropowatość powierzchni, jest siła nacisku kulki, która w każdym przypadku obróbki ma wartość optymalną. Stosowanie mniejszej od optymalnej wartości siły P powoduje niecałkowite odkształcenie nierówności, natomiast zastosowania większej od optymalnej wywołuje łuszczenie powierzchni. Uwagi te można odnieść też do takich parametrów nagniatania, jak posuw i średnica kulki. Stosowanie zbyt małych ich wartości jest korzystne tylko w tym przypadku, kiedy nie występuje zjawisko łuszczenia materiału. W przeciwnym przypadku należy przyjmować w procesie obróbki nieco większe wartości tych parametrów.

Kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi wywołuje w WW naprężenia ścisiskające o maksymalnej wartości dochodzącej do 900 MPa, występujące na głębokości  $25 \div 40 \mu\text{m}$  pod powierzchnią. Głębokość zalegania pola naprężeń wynosi  $150 \mu\text{m}$ . Kulkowanie strumieniowe wywołuje utwardzenie WW o maksymalnym stopniu zgniotu dochodzącym do 50%, a głębokość umocnienia nie przekracza  $300 \mu\text{m}$ . Natomiast chropowatość powierzchni  $R_a$  nie przekracza  $1,25 \mu\text{m}$  [8, 71].

W omawianym procesie obróbki na konstytuowanie WW wpływają podobne czynniki jak przy obróbce strumieniowo-ścierniej. Jako optymalny kąt natrysku, w aspekcie umocnienia WW, zaleca się przyjmować  $80-85^\circ$ . Dla tych wartości istnieje najmniejsze prawdopodobieństwo zderzenia się odbitych kulek od powierzchni z kulkami wylatującymi z dyszy [28].

W czasie obróbki elektroerozyjnej na skutek występowania lokalnej wysokiej temperatury obserwowane są zmiany strukturalne w WW. W mikrostrukturze materiału obrabianego elektroerozyjnie występują najczęściej trzy typowe warstwy:

- 1) tzw. "warstwa biała", stanowiąca nadtopioną część materiału obrabianego z wtrąceniami materiału elektrody roboczej; jej twardość jest zbliżona lub nieco większa od twardości rdzenia,
- 2) strefa o zwiększonej twardości, prawdopodobnie zawiera dużą ilość węglików żelaza i węglików pierwiastków stopowych,
- 3) strefa mająca zazwyczaj mniejszą twardość od materiału rdzenia.

W pracy [90] wyróżniono natomiast dodatkowo jedną warstwę pośrednią o strukturze odpuszczania. Wydaje się, iż w dalszym ciągu zmiany strukturalne zachodzące w czasie obróbki elektroerozyjnej w WW nie są dokładnie zbadane. Ze względu na cechy obróbki elektroerozyjnej bardziej adekwatny jest model cieplny powstawania naprężeń w WW. Większość prac z tego zakresu podaje, że naprężenia powstałe w wyniku obróbki elektroerozyjnej są naprężeniami rozciągającymi rzędu 300-400 MPa. Nie brak też poglądów przeciwnych, np. w pracy [51] podano, iż w WW są naprężenia ściskające. Ze względu na brak znacznie większych sił w procesie drążenia, utwardzenia w wyniku obróbki elektroerozyjnej nie występuje, aczkolwiek spotyka się w niektórych opracowaniach, iż przy małych energiach wyładowań i krótkich impulsach może wystąpić utwardzenie WW.

Obróbka elektroerozyjna ma wiele specyficznych cech, które w sposób widoczny odróżniają ją od innych metod obróbczych. Ze względu właśnie na te cechy, a szczególnie ze względu na brak występowania sił w samym procesie obróbki, nie ma przesłanek, które mogłyby świadczyć o możliwości powstania falistości powierzchni. Może natomiast powstawać błąd kształtu powierzchni, spowodowany zużyciem lub odkształceniami cieplnymi elektrody roboczej. Chropowatość powierzchni zależy głównie od energii i częstotliwości pojedynczych wyładowań, a te z kolei określone są przez tzw. elektryczne warunki drążenia [1,48,65,90,110,119]. Na ogół chropowatość  $R_a$  wzrasta wraz ze zwiększaniem się napięcia zasilania  $U_0$  pojemności C, natomiast jedynie nieznacznie maleje wraz ze wzrostem oporu R. Stwierdzono ponadto, że wzrost ten jest bardziej intensywny dla stali niż dla węglików spiekanych oraz, że nierówność powierzchni drążonej przy użyciu generatora RC jest większa niż dla powierzchni drążonej generatorem RLC. Uogólniając można podać, iż chropowatość powierzchni zawiera się tu w zakresie  $R_a = 1,25 \div 10 \mu\text{m}$ .

Obróbce elektrochemicznej ECM nie towarzyszą duże zmiany temperatury i oddziaływania mechaniczne, które mogłyby wywołać zmiany strukturalne materiału. W trakcie takiej obróbki powierzchnia metalu podlega działaniom elektrochemicznym elektrolitu z nałożonymi polami prądu elektrycznego i hydrodynamiki przepływu elektrolitu.

Stopień zmienności głównych parametrów obróbki zależy przede wszystkim od hydrodynamiki przepływu elektrolitu, warunki bowiem hydrodynamiczne, rozkłady prędkości, ciśnień, charakter przepływu w sposób decydujący determinują procesy wymiany masy i ciepła. W związku z tym liczba czynników wpływających na przebieg procesu obróbki zwiększa się, a sprzężenia między nimi są bardzo złożone [22,73,102].

W dostępnej literaturze brak jest zgodności na temat powstawania naprężeń w WW po obróbce elektrochemicznej. Według [48,108] obróbka elektrochemiczna nie wprowadza naprężeń w WW. Istniejące ewentualnie naprężenia są wynikiem stanu WW ukonstytuowanego w czasie obróbki poprzedzającej. Niektórzy autorzy podają natomiast, iż w wyniku obróbki elektroche-

micznej powstają naprężenia ściskające. Można spotkać się też z opisami, że charakter procesu obróbki może sugerować przesłanki powstawania naprężeń według modelu cieplnego.

Stosunkowo więcej prao poświęconych jest wpływowi procesu obróbki elektrochemicznej na chropowatość obrabianej powierzchni [48]. Spośród wielu czynników największy wpływ mają właściwości fizyczno-chemiczne materiału obrabianego, rodzaj i stężenie elektrolitu, gęstość prądu, makro i mikrogeometria elektrod i inne.

W [21] stwierdzono też duży wpływ struktury obrabianego materiału na chropowatość powierzchni ze względu na niejednakową roztopialność elektrochemiczną poszczególnych faz. Zauważono pogorszenie chropowatości powierzchni wraz ze wzrostem rozmiarów ziarn. Wyjaśnia się to tym, że najpierw roztopia się metal przy granicach ziarn, a następnie dopiero same ziarna. Na podstawie zdjęć skaningowych stwierdzono również, że duży wpływ na proces roztopiania mają warunki hydrodynamiczne, a przede wszystkim wymiar i orientacje granic ziarn w stosunku do przepływu elektrolitu. Prędkość roztopiania osiąga maksimum przy granicach ziarn prostopadłych do strumienia elektrolitu, a minimum w przypadku równoległych. Także w zależności od doboru warunków obróbki hydrodynamicznych, elektrycznych roztopianie anodowe przebiega w różny sposób. W pewnych warunkach powierzchnia jest roztopiana równomiernie, a w innych nie. Parametrem decydującym o przebiegu procesu jest wartość energii aktywacji  $E_a$ . Stwierdzono, że ze wzrostem  $E_a$  zwiększa się rola procesów elektrodowych. Na przykład powierzchnia próbki obrobionej przy napięciu 20V, temperaturze 318 K oraz natężeniu przepływu elektrolitu 50 l/min jest roztopiana równomiernie ( $E_a = 24975$  J/mol), powierzchnia zaś próbki obrobionej przy napięciu 20V, temperaturze 318 K oraz natężeniu przepływu elektrolitu 100 l/min jest roztopiana nierównomiernie ( $E_a = 43096$  J/mol).

Na duży wpływ struktury obrabianego materiału na chropowatość powierzchni zwrócono również uwagę w pracy [88]. Mianowicie prędkość obróbki poszczególnych części składowych struktury nie jest jednakowa, w związku z czym prędkość posuwu przedmiotu obrabianego nie odpowiada prędkości roztopiania wszystkich faz struktury, jakie mogły być osiągnięte w danych warunkach. Szczególnie chodzi o różnice w obrabialności elektrochemicznej faz z selektywnym wytrawianiem poszczególnych składników strukturalnych obrabianego materiału. Ponieważ lekko trawione składniki zostaną usunięte na większej głębokości, szczelina robocza w tych miejscach będzie większa. Prowadzi to w sumie do pogorszenia chropowatości obrabianej powierzchni. W rezultacie różnorodnej obrabialności elektrochemicznej poszczególnych składników struktury mogą wystąpić zmiany w warstwach powierzchniowych. Stąd nasuwa się wniosek, że stan powierzchni po obróbce elektrochemicznej z użyciem agresywnych roztworów jako elektrolitów może być obszarem pozabawionym ciągłości, mającym wytrawienia i ubytki.

Nie ma wyraźnej zgodności autorów co do wpływu gęstości prądu na chropowatość obrabianej powierzchni. W pracy [22] podano, że krzywe zależności wpływu gęstości prądu na chropowatość mają punkty ekstremalne oraz, że przy dużej gęstości prądu na chropowatość obrabianej powierzchni ma duży wpływ makro- i mikrogeometria powierzchni elektrod.

Z kolei w pracy [80] stwierdzono, że ze wzrostem gęstości prądu chropowatość powierzchni spada i następnie pozostaje stała do określonej wartości gęstości prądu. Podobne stanowisko można spotkać w opracowaniu [122]. W pracy [88] zaleca się dla dużej gęstości prądu zwiększać prędkość przepływu elektrolitu. Powoduje to nie tylko dobre wypłukiwanie produktów roztworzonego materiału, ale i dodatkowe wygładzanie nierówności obrabianej powierzchni. Dużą gęstość prądu zaleca się stosować szczególnie dla stopów wielofazowych, ponieważ zmniejsza to różnice w wytrawianiu poszczególnych składników strukturalnych materiału. Na ogół chropowatość powierzchni po obróbce elektrochemicznej waha się w granicach  $R_a = 0,16 \div 2,5 \mu\text{m}$ .

Z wieloletnich doświadczeń autora dotyczących badań eksperymentalnych nad wpływem sposobów obróbki na stan WW wynika, iż w przypadku praktycznego korzystania z wyników badań podawanych w literaturze nieodzowne jest przeprowadzanie tzw. badań uzupełniających. Ma to głównie na celu uwzględnienie najistotniejszego wpływu określonej grupy parametrów technologicznych (PT) w danych warunkach produkcyjnych. Takie adaptowanie wyników badań do określonych warunków technologicznych zapewnia większą skuteczność wdrażania racjonalnych warunków obróbki dla kształtowania żądanej WW elementów.

### 2.1.2. Właściwości użytkowe warstwy wierzchniej po obróbce powierzchniowej

Ze względu na fakt, że przedmiotem rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych w pracy jest klasa elementów pracujących w warunkach obciążeń zmęczeniowych w środowisku korozyjnym, analizę literatury zawężono do wpływu stanu WW na wytrzymałość zmęczeniową i na zużycie korozyjne elementów.

Z dziedziny badań wpływu stanu WW na wytrzymałość zmęczeniową elementów wprawdzie ukazują się dużo prac, lecz mają one wciąż charakter fragmentaryczny. Istotną trudność w ukształtowaniu jednolitego poglądu na mechaniczne zmęczenie wynika z bardzo złożonego charakteru procesu zmęczenia i niemożliwości kompleksowego uwzględnienia wszystkich czynników mających wpływ na ten proces [12,33,57,123].

W ciągu wielu dziesięcioleci w badaniach zjawisk zmęczeniowych stosowano w przeważającej mierze metody fenomenologiczne, umożliwiające obserwację jedynie końcowego efektu złożonych i długotrwałych procesów, których nie tylko nie śledzono, ale z których istnienia nie zawsze zdawano sobie sprawę. Badania mikroskopowe pozwoliły z biegiem czasu wnikać w zmiany strukturalne wywołane przez zmienne obciążenia, gęstość dyslokacji, pasma

poślizgu i uczynić je odpowiedzialnymi za przebieg zjawiska zmęczenia. Procesy te dokonują się we wczesnym stadium zmęczenia i są zlokalizowane w WW [30,57,67,87].

Przyczyną zjawiska inicjacji pęknięć zmęczeniowych w WW są odmienne warunki przebiegu odkształceń w WW i w rdzeniu. Warstwa wierzchnia ma odmienne warunki przebiegu mikroodkształceń plastycznych wynikających z samego faktu istnienia powierzchni swobodnej, pokrytej często warstwą tlenków, azotków lub innych adsorbowanych cząstek. Większa zdolność od mikroodkształceń plastycznych w WW spowodowana jest tym, że naprężenia potrzebne do uruchomienia źródeł dyslokacji leżących w WW są mniejsze niż dla źródeł leżących we wnętrzu kryształu.

W licznych pracach [12,15,25,47,57,59,62,70,103,123] stwierdza się zgodnie istnienie ścisłych zależności między stanem WW a procesami zmęczeniowymi. Uważa się, że zgniot powierzchniowy oraz naprężenia własne ściskające zwiększają wytrzymałość zmęczeniową elementów. Istnieją natomiast w dalszym ciągu trudności w dokładnym rozgraniczeniu udziału tych parametrów stanu WW we wzroście wytrzymałości zmęczeniowej, ponieważ zgniotowi powierzchniowemu nieodłącznie towarzyszy określony stan naprężeń własnych. Spośród trzech wyróżniających się rodzajów naprężeń własnych decydujący wpływ na wytrzymałość zmęczeniową mają naprężenia I rodzaju, ponieważ występują one w całej masie elementów konstrukcyjnych i nawet działając samodzielnie mogą doprowadzić do utraty spójności na dużych powierzchniach, zmniejszając w ten sposób powierzchnie przekrojów czynnych. Wpływ naprężeń własnych WW na wytrzymałość zmęczeniową elementów wiąże się ze zmianą naprężeń średnich od obciążeń zewnętrznych [75, 82,92]. Naprężenia własne mogą przyczynić się do zmniejszenia lub zwiększenia naprężeń średnich i tym samym kształtować wytrzymałość zmęczeniową.

Udział i znaczenie naprężeń własnych w WW w mechanizmie zmęczenia można sprowadzić do dwóch zagadnień, tj. do bezpośredniego oddziaływania na pole naprężeń od obciążeń eksploatacyjnych oraz do oddziaływania pośredniego przez nieodłącznie towarzyszące naprężeniom własnym zmiany w strukturze materiału [67]. Dla większości spotykanych w praktyce rodzajów obciążeń eksploatacyjnych naprężenia własne ściskające zmniejszają wartość maksymalnych naprężeń stycznych, warunkujących powstanie mikropęknięć zmęczeniowych.

Drugi etap procesu zmęczenia, tj. rozwój mikropęknięć poprzez podkrytyczny ruch szczelin jest kontrolowany w głównej mierze przez naprężenia normalne. W pracy [92], przy założeniach upraszczających zarówno odnośnie do materiału, jak i współczynnika spiętrzenia naprężeń, na podstawie opracowanych zależności przewidziano zmianę wytrzymałości zmęczeniowej pod wpływem naprężeń własnych w granicach  $\pm 62,5\%$ . Nie sposób też pominąć opracowań [57,67,120], gdzie wykazano na wpływ obecności naprężeń własnych na rozwój i szybkość rozprzestrzeniania się szczeliny zmęczeniowej.

Umocnienie WW charakteryzowane jest przyrostem jej twardości w stosunku do rdzenia materiału i wraz z rozkładem naprężeń własnych decyduje o wzroście wytrzymałości zmęczeniowej elementu [25,44,47]. Wzrost ten zależy od rodzaju materiału, jego struktury, wielkości i kształtu elementu [44, 57,64,86,100,103,113,123]. Bardzo cenną zaletą umocnionej WW z obecnością naprężeń ściskających jest sprowadzenie niebezpieczeństwa powstania ognisk zmęczeniowych pod powierzchnię, a więc odizolowanie ich od powierzchniowych koncentratorów naprężeń, jakimi są mikrokarby wynikające z chropowatości. Na ogół uważa się za najkorzystniejszy w aspekcie wytrzymałości zmęczeniowej elementu stan WW z obecnością naprężeń ściskających i umocnienia o dużych wartościach maksymalnych i małym gradientie.

Duży wpływ na zjawisko umocnienia ma również struktura i skład chemiczny obrabianego materiału. Największy wzrost twardości w wyniku obróbki mechanicznej obserwuje się w stalach o strukturze ferrytycznej, najmniej o strukturze sorbitycznej [67].

Badania struktury geometrycznej powierzchni obejmują zagadnienia falistości, chropowatości i nośności. O odporności obiektu na zmęczenie decyduje głównie chropowatość powierzchni stanowiąca mikrokarby, będące ogniskami pęknięć zmęczeniowych. W obliczeniach wytrzymałościowych wpływ chropowatości powierzchni na zmęczenie uwzględnia się stosując tzw. współczynnik stanu powierzchni [75]

$$\beta_p = \frac{Z_{gl}}{Z_{po}}, \quad (1)$$

gdzie:

$Z_{gl}$  - wytrzymałość zmęczeniowa próbki gładkiej polerowanej,

$Z_{po}$  - wytrzymałość zmęczeniowa próbki o danym stanie powierzchni.

Współczynnik stanu powierzchni nie daje pełnego obrazu wpływu chropowatości powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową bez uwzględnienia rodzaju struktury geometrycznej powierzchni. Dla przykładu w przypadku struktury anizotropowej najniekorzystniejsze są przypadki, kiedy kierunek struktury powierzchni jest normalny do kierunku działania naprężeń od obciążeń zewnętrznych. Wówczas najistotniej uwidacznia się działanie mikrokarbów wynikających z chropowatości, jako koncentratorów naprężeń [15]. Z tego też względu najodpowiedniejsze dla elementów pracujących w warunkach obciążeń zmiennych są struktury izotropowe.

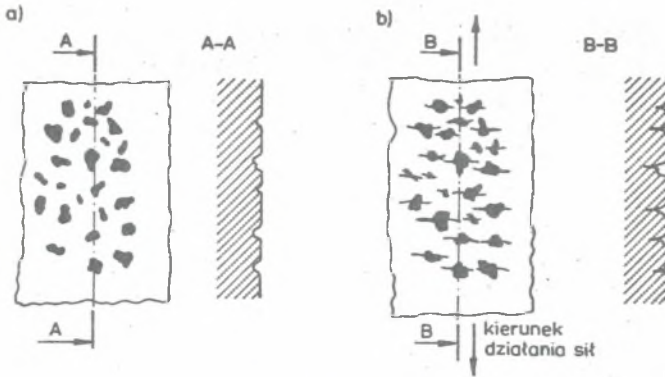
Na ogół istnieje zgodność w analizowanej literaturze, że ukonstytuowany stan WW może wpływać zarówno dodatnio, jak i ujemnie na odporność korozyjną elementów. Zwiększenie odporności wywołuje stan WW z obecności naprężeń ściskających i umocnienia, ale tylko w tym przypadku, kiedy WW charakteryzuje się wysoką jednorodnością właściwości swoich parametrów. Inne wymagania - to mała chropowatość powierzchni bez defektów, w których lokalizują się ogniska korozji.

Dla elementów pracujących w warunkach obciążeń zmęczeniowych największy wpływ na pogarszanie się wytrzymałości w czasie użytkowania ma korozja: wżerowa, naprężeniowa i międzykrystaliczna. Powszechnie istnieje zgodność, iż obecność w WW naprężeń ściskających i umocnienia zwiększa odporność elementów na korozję naprężeniową od 5-60 razy w zależności od rodzaju materiału, środowiska korozyjnego, realizowanych naprężeń rozciągających w czasie pracy i stosowanych warunków obróbki. Dość dobre wyniki otrzymano stosując kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi i metalowymi oraz obróbkę strumieniowo-ścierną [2,16,17,18,44,96].

Charakter pracy wymaga szerszego omówienia problemu odporności elementów na obciążenia zmęczeniowe w warunkach korozyjnych. Jest to proces stopniowego gromadzenia uszkodzeń elementu, uwarunkowany jednoczesnym działaniem obciążeń i korozyjnie aktywnego środowiska - nazywany również zmęczeniem korozyjnym [52,96]. Jest to więc ten typ starzenia elementu, który można uważać za najbardziej adekwatny do warunków rzeczywistych. Proces zmęczenia korozyjnego jest bardzo złożony. Mechanizm korozji metali pod działaniem naprężeń zmiennych związany jest głównie z ich mikrostrukturą, ze wzajemnym oddziaływaniem metalu i aktywnego wodoru, z wpływem procesów elektrochemicznych korozji na zmęczenie materiału. Zjawiska te do tej pory nie są jeszcze dostatecznie poznane. Znany jest np. wpływ defektów sieci krystalicznej na proces korozyjnego pęknięcia, mówiący o związku miejsca powstania i kierunku propagacji pęknięć korozyjnych z charakterem defektów sieci krystalicznej. Nie poznano natomiast kinetyki procesu pęknięcia w zależności od defektów sieci krystalicznej [96].

Teoria Evansa mówi o tym, że naprężenia zmienne koncentrują się początkowo we wszelkiego rodzaju pierwotnych koncentratorach naprężeń (submikrodefekty powierzchniowe, np. skupiska dyslokacji i wakansów, mikropeknięcia, pory, rysy i inne), a następnie we wżerach korozyjnych. Są one powodem zniszczenia pasywnej warstwy ochronnej na dnie koncentratorów naprężeń oraz obniżenia stopnia uporządkowania struktury materiału w tych miejscach ogniw korozyjnych: dno koncentratora naprężeń - jego ścianki - powierzchnia metalu w sąsiedztwie koncentratora naprężeń. Dno koncentratora naprężeń działa jak anoda ogniw. Wżery korozyjne są miejscem powstawania pęknięć zmęczeniowych w wyniku działania zmiennych naprężeń. Przedstawiono to na rys. 1. Ogniw zmęczeniowe są przyczyną powiększania się pierwotnych wgłębień, co zwiększa koncentrację naprężeń i wzmacnia działanie mikroogniw korozji. Postępujące zwiększanie się naprężeń lokalnych na dnie koncentratorów naprężeń doprowadza do powstania nowych pęknięć korozyjnych, których rozwój można uważać za jednoczesny proces powstawania w strefie pęknięcia oddzielnych mikro- i submikropęknięć. Elektrochemiczna teoria Evansa ma wielu przeciwników dlatego, że nie objaśnia dostatecznie wszystkich zjawisk związanych ze zmęczeniem korozyjnym, mówi tylko o powstaniu mikroogniw korozyjnych i ich wpływie na rozwój pęknięć zmęczeniowych.





Rys. 1. Rozwój szczelin korozyjno-zmęczeniowych zaczynających się od wżerów korozyjnych:

a) powierzchnia metalu bez działania naprężeń zmiennych, b) powierzchnia metalu w następstwie działania naprężeń zmiennych [96]

Fig. 1. Development of corrosion-fatigue fissures originating from corrosion pits:

a) metal surface without action of variable stresses, b) metal surface as a result of variable stresses action [96]

Inną z hipotez mechanizmu zmęczenia korozyjnego jest adsorpcyjno-elektrochemiczna teoria zmęczenia korozyjnego, twórcą której jest G.W. Karpieńko [52]. Uważa on że w wyniku równoczesnego działania na metal cyklicznych obciążeń i ośrodka korozyjnego występują cykliczne mikroodkształcenia, których wielkość jest różnorodna w różnych miejscach materiału. W warunkach tych zachodzą procesy adsorpcji, dyfuzji i korozji elektrochemicznej, które są aktywizowane przez deformacje. Zanim rozpocznie się proces korozji, następuje adsorpcja aktywnych powierzchniowo składników ośrodka korozyjnego, np. jonów z silnych elektrolitów lub całych cząsteczek słabych elektrolitów, a przy korozji z depolaryzują wodorową - adsorpcja aktywnego chemicznie wodoru na katodowych obszarach materiału. Adsorpcja ta jest powodem zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej materiału. Można tu rozróżnić dwa etapy:

a) adsorpcja aktywnych powierzchniowo substancji na powierzchni odkształconego materiału, co jest powodem uplastycznienia tej powierzchni, tj. obniżenia granicy płynięcia i umocnienia materiału; mechanizm uplastycznienia tłumaczy się zmniejszeniem oporu ruchu dyslokacji w kierunku powierzchni kryształów w związku ze zmniejszeniem się ich energii powierzchniowej na skutek adsorpcji.

b) adsorpcja aktywnych powierzchniowo substancji na powierzchni defektów wewnątrzkrystalicznych, która doprowadza do zwiększenia kruchości i zmniejszenia wytrzymałości materiału.

Według teorii Wiedienkina i Siniawskiego [96] mechanizm korozyjnego zmęczenia jest taki sam, jak zmęczenia na powietrzu z tym tylko, że w ośrodkach korozyjnych nasila się prędkość propagacji pęknięć zmęczeniowych. Według tej teorii proces zmęczenia korozyjnego zachodzi następująco: wskutek uszkodzenia pasywnej powłoki ochronnej pod wpływem obciążeń zmiennych i działania ośrodka korozyjnego zwiększa się możliwość ruchu dyslokacji w kierunku powierzchni i powstania wakansów, co w końcu prowadzi do zwiększenia możliwości poślizgów i pęknięcia materiału.

Z kolei hipoteza korozyjno-mechaniczna jest uzupełnieniem teorii Evansa o mechanizmie zmęczenia korozyjnego metali. Według niej oprócz działania mikroogniw korozji duży wpływ na zmęczenie korozyjne ma czynnik mechaniczny. Obciążenia cykliczne wywołują w materiale cykliczne naprężenia. W pierwszej fazie cyklu są to naprężenia rozciągające, a w drugiej - ściskające. Ich następstwem jest tarcie wewnętrznych powierzchni szczelin i mechaniczne uszkodzenie pasywnej powłoki ochronnej. Jednocześnie w drugiej fazie cyklu naprężeń następuje wyrzucenie elektrolitu ze szczelin, a w fazie rozciągania próbki - zasysanie nowej porcji elektrolitu. Zjawiska te wpływają na aktywizację mikroogniw korozyjnych i rozwój szczelin korozyjno-zmęczeniowych. Równocześnie może zachodzić jeszcze jeden proces, a mianowicie: nagromadzone wewnątrz szczelin produkty korozji mogą spełnić rolę klina i tworzyć dźwignię podczas działania naprężeń ściskających. Jest to zatem czysto mechaniczny proces propagacji pęknięć. Ponadto nagromadzenie produktów korozji w szczelinach prowadzi do ich całkowitego wypełnienia i uwięzienia elektrolitu w szczelinie. Oczywiście proces zmęczenia korozyjnego zachodzi głównie wówczas, gdy element pracuje w zakresie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej. W ośrodku korozyjnym badane elementy nie wykazują określonej granicy wytrzymałości zmęczeniowej. Na ogół dla obciążeń asymetrycznych z przewagą naprężeń rozciągających zmęczenie korozyjne wzrasta, natomiast w przypadku przewagi naprężeń ściskających zmniejsza się. Z kolei materiał zanieczyszczony wtrąceniami niemetalicznymi wykazuje mniejszą odporność na zmęczenie korozyjne.

Brak jest również zależności pomiędzy odpornością na zmęczenie korozyjne elementu a jego wytrzymałością na rozciąganie. Obróbka cieplna elementu nie zwiększa jego odporności na omawiane zmęczenie zarówno w przypadku stali węglowych, jak i średniostopowych. Zauważa się większą odporność na zmęczenie korozyjne elementów wykonanych ze stali chromowych. Uważa się, że odporność na zmęczenie korozyjne jest bardziej związana z odpornością materiału na korozję aniżeli dużą wytrzymałością mechaniczną.

Stan badań nad istotą procesu zmęczenia korozyjnego wykazuje, iż w obecnej chwili nie ma też jednoznacznej definicji określającej ten proces. Jako miarę zmęczenia zaleca się przyjmować spadek wytrzymałości zmęczeniowej elementu pracującego w warunkach korozyjnych odniesiony do tej wytrzymałości i takiej samej liczby cykli obciążenia, kiedy element pracuje w warunkach nie wykazujących zużycia korozyjnego. Należy jednak

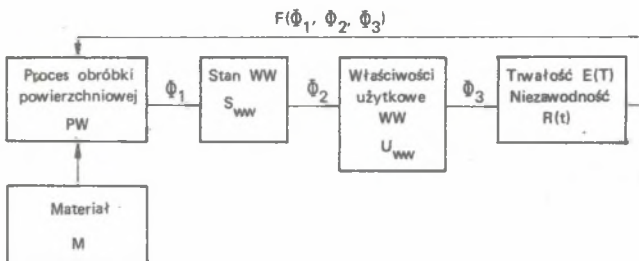
pamiętać, że na spadek wytrzymałości wpływają również takie czynniki, jak temperatura, kruchość wodorowa, korozja elektrochemiczna i inne. Stąd też trudny jest do wyodrębnienia udział zmęczenia korozyjnego w tym procesie [96]. Istnieje też pogląd, iż zmęczenie korozyjne można charakteryzować umowną granicą zmęczenia, tj. takim naprężeniem, przy którym element nie ulega jeszcze pęknięciu, przy zadanej liczbie cykli obciążenia [52].

Przedstawiona istota procesu zmęczenia korozyjnego wykazuje również, że i w tym przypadku zgniot, a głównie naprężenia ściskające w WW wpływają korzystnie na zwiększenie odporności elementów na ten typ korozji. Wzrost odporności ocenia się na ogół w stopniu porównywalnym do podanego wzrostu, uwzględniając typy korozji omówione uprzednio [3,4,9,13,37,38,39,96].

Bardzo duży wpływ na właściwości użytkowe WW mają jej różnego rodzaju wady w postaci rys., bruzd, mikropęknięć, przypaleń, wytrawień materiału na granicach ziarn itp. Takie wady mogą pogarszać właściwości użytkowe WW, w szczególności wytrzymałość zmęczeniową i odporność na korozję, nawet do 30%.

## 2.2. Analiza czynnikowa tworzenia trwałości i niezawodności elementów maszyn

Istniejące związki pomiędzy procesem obróbki powierzchniowej (PW), stanem WW ( $S_{ww}$ ), jej właściwościami użytkowymi ( $U_{ww}$ ), trwałością  $E(T)$  i niezawodnością  $R(t)$  można przedstawić jak na rys. 2.



Rys. 2. Schemat związków przyczynowych pomiędzy procesem technologicznym, stanem WW, jej właściwościami użytkowymi, trwałością i niezawodnością elementów

Fig. 2. Interrelation between processing method, surface layer condition and useful properties, durability, and reliability of elements

Znając zależności przyczynowe  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  i  $\phi_3$  można tworzyć dyrektywy  $F(\phi_1, \phi_2, \phi_3)$ , określające sposób realizacji procesu obróbki.

Realizacja tego zagadnienia wymaga szczegółowego przedstawienia zbiorów parametrów przynależnych do PW,  $S_{ww}$ ,  $U_{ww}$ ,  $E(T)$  i  $R(t)$  oraz zastosowa-

nia fizykalnej analizy czynnikowej, umożliwiającej głębsze poznawanie skomplikowanych i skorelowanych procesów fizycznych i fizyczno-chemicznych zachodzących w trakcie konstituowania WW. Wszystko to może pomóc w opracowaniu przesłanek tworzenia w procesie obróbki WW o właściwościach użytkowych, określonych odpowiednimi wskaźnikami niezawodnościowymi elementów.

### 2.2.1. Zbiór parametrów technologicznych procesu obróbki

W zbiorze tym wyróżniono następujące podzbiory parametrów:

- podzbiór parametrów związany z warunkami obróbki,
- podzbiór parametrów związany z obrabianym materiałem,
- podzbiór parametrów towarzyszących procesowi obróbki.

Na podzbiór warunków obróbki składają się:

- parametry narzędzia lub czynnika roboczego ( $f_{N,CR}$ ),
- parametry obróbki ubytkowej lub nagniataniem ( $f_{ou,n}$ ),
- urządzenia technologiczne, rodzaj, stan techniczny ( $f_{uT}$ ),
- właściwości fizyczne i chemiczne płynu obróbkowego ( $f_{PO}$ ).

Stanowi to podzbiór

$$f_{wo} = \{f_{N,CR}, f_{ou,n}, f_{uT}, f_{PO}\}. \quad (2)$$

Podzbiór parametrów związany z obrabianym materiałem obejmuje:

- stan WW od obróbki poprzedzającej, np. od poprzedzającej operacji ( $S'_{ww}$ ),
- wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ),
- moduł Younga ( $E$ ),
- granicę plastyczności ( $R_e$ ),
- twardość ( $H_M$ ),
- strukturę ( $S_M$ ),
- charakter ziarn lub rozmiar ziarn ( $f_Z$ ),
- inne parametry w zależności od specyfiki materiału i elementu ( $I_M$ ).

Zatem podzbiór ten można przedstawić jako

$$f_M = \{S'_{ww}, R_m, E, R_e, H_M, S_M, f_Z, I_M\}. \quad (3)$$

Podzbiór parametrów towarzyszących procesowi obróbki to:

- czynnik ludzki ( $f_u$ ),
- warunki otoczenia ( $f_o$ ).

Podzbiór ma postać:

$$f_t = \{f_u, f_o\}. \quad (4)$$

Uwzględniając poszczególne podzbiory, zbiór parametrów technologicznych procesu obróbki można przedstawić w postaci

$$F_{PT} = \{f_M, f_{wo}, f_t\}. \quad (5)$$

### 2.2.2. Zbiór parametrów fizycznych i fizyko-chemicznych procesu obróbki

Podczas procesu obróbki w zewnętrznej warstwie przedmiotu występują zjawiska powodujące konstytuowanie WW. Na przebieg tych zjawisk ma wpływ zbiór następujących parametrów fizycznych i fizyko-chemicznych procesu obróbki:

- siły powstające w czasie obróbki (P),
- ciepło wywiązujące się w procesie obróbki (L),
- parametry oddziaływania ośrodka, w którym odbywa się proces obróbki (P<sub>o</sub>),
- czas trwania oddziaływania parametrów fizycznych i fizyko-chemicznych (t<sub>p</sub>).

W związku z tym zbiór ma postać

$$F_{fPT} = \{P, L, P_o, t_p\}. \quad (6)$$

Na zbiór procesów konstytuujących WW podczas obróbki składają się:

- odkształcenia się materiału WW (Δh),
- zmiany właściwości fizycznych na skutek zmian temperatury bez przemian fazowych (W<sub>f</sub>),
- przemiany fazowe (P<sub>f</sub>),
- zmienne w czasie pola naprężeń (σ<sub>zt</sub>),
- zmienne w czasie pola temperatury (t<sub>z</sub>),
- zjawiska fizyko-chemiczne na granicy metal-ośrodek (f<sub>ch</sub>).

Zbiór ma postać

$$F_{WwO} = \{\Delta h, W_f, P_f, \sigma_{zt}, t_z, f_{ch}\}. \quad (7)$$

### 2.2.3. Zbiór parametrów stanu warstwy wierzchniej po obróbce

Zbiór parametrów stanu WW obejmuje podzbiór parametrów określających stereometrię powierzchni  $f_{sp}$  i podzbiór parametrów stref podpowierzchniowych  $f_{spp}$  [35].

Na podzbiór parametrów  $f_{sp}$  składają się:

- chropowatość i falistość ( $R_a, R_z, f$ ),
- rodzaj struktury powierzchni ( $R_s$ ),
- profil powierzchni ( $R_p$ ),
- powierzchniowy i liniowy udział nośny ( $N_p, N_l$ ).

Zatem

$$f_{sp} = \{R_a, R_z, f, R_s, R_p, N_p, N_l\}. \quad (8)$$

Podzbiór parametrów stref podpowierzchniowych obejmuje:

- naprężenia własne pierwszego, drugiego i trzeciego rodzaju w strefach podpowierzchniowych WW ( $G_w$ ),
- mikro- i makrotwardość materiału stref podpowierzchniowych WW ( $H_u$ ),
- strukturę materiału stref podpowierzchniowych ( $S$ ),
- rozmiar ziarn materiału stref podpowierzchniowych ( $F$ ),
- teksturę ( $T$ ),
- właściwości chemiczne materiału stref podpowierzchniowych ( $C$ ),
- stan energetyczny powierzchni ( $E_p$ ),
- wady materiału stref podpowierzchniowych ( $W_m$ ),
- grubość WW ( $h$ ).

Zatem

$$f_{spp} = \{G_w, H_u, S, F, T, C, E_p, W_m, h, \bar{G}\}, \quad (9)$$

gdzie:

$$\bar{G} = \left\{ \frac{dG_w}{dh}, \frac{dH_u}{dh}, \frac{dS}{dh}, \frac{dF}{dh}, \frac{dC}{dh}, \frac{dW_m}{dh} \right\}.$$

Zbiór parametrów stanu WW jest następujący

$$F_{S_{WW}} = \{f_{sp}, f_{spp}\}. \quad (10)$$

#### 2.2.4. Zbiór parametrów właściwości użytkowych warstwy wierzchniej

Zbiór ten obejmuje te parametry, które charakteryzują odporność WW na działanie określonych czynników wymuszających i może obejmować:

- wytrzymałość zmęczeniową, w tym wytrzymałość zmęczeniową kontaktową ( $Z, Z_k$ ),
- zużycie ścierne ( $Z_c$ ),
- zużycie korozyjne ( $Z_r$ ),
- zużycie erozyjne itp. ( $Z_e$ ).

Zbiór ten można przedstawić w postaci

$$F_{U_{WW}} = \{Z, Z_k, Z_o, Z_r, Z_e\}. \quad (11)$$

### 2.2.5. Zbiór parametrów trwałości i niezawodności elementów maszyn

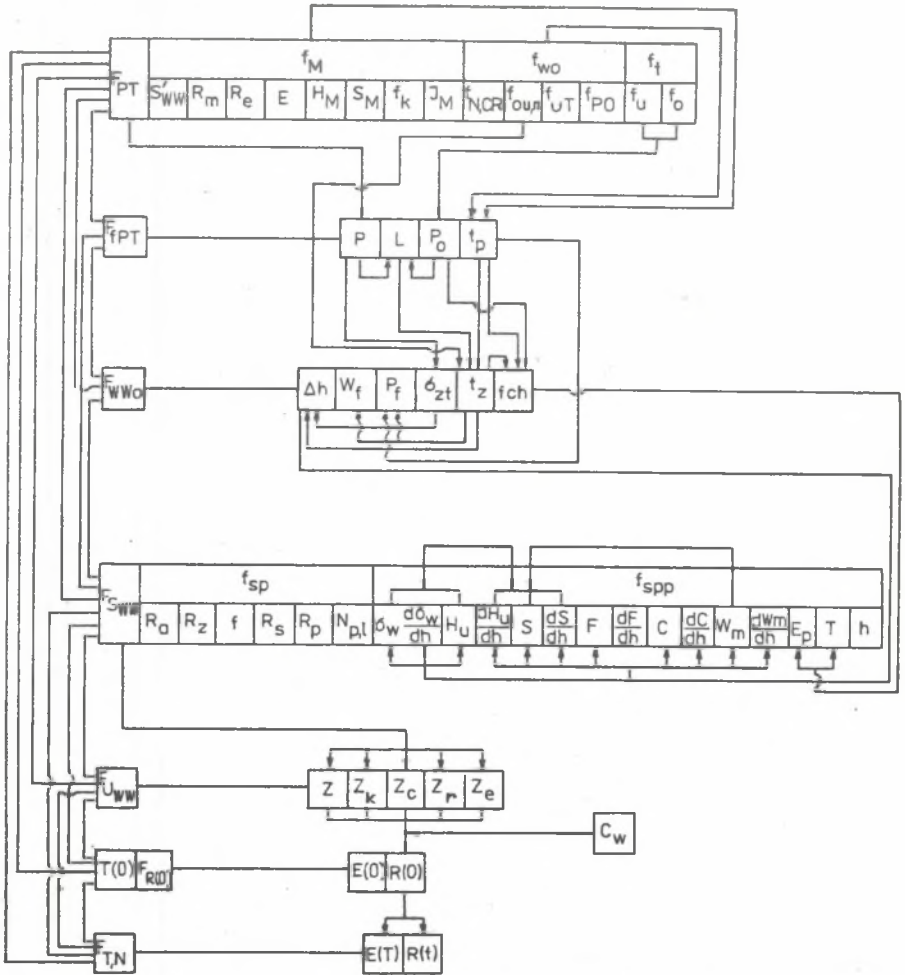
W zależności od charakteru czynników wymuszających, które działają na elementy w czasie eksploatacji, trwałość i niezawodność elementów charakteryzowana jest wieloma wskaźnikami, które zawarte są w normie PN-77/N-04005 oraz w normach zagranicznych, np. radzieckiej GOST-13377-67, niemieckiej DIN 40041, amerykańskiej MIL-STO-721A. Wskaźniki te opisane są również w licznych pracach [5,26,31,56,81,105]. W opracowaniu natomiast wprowadzono dodatkowo pojęcie parametrów trwałości i niezawodności początkowej elementu  $E(0)$  i  $R(0)$ .

Schemat kształtowania trwałości i niezawodności elementów od chwili rozpoczęcia wytwarzania ich w procesie obróbki powierzchniowej do określonego czasu eksploatacji przedstawiono na rys. 3. Uwidoczniono ważniejsze związki przyczynowe pomiędzy trwałością i niezawodnością elementów a warunkami procesu technologicznego. W budowie schematu wykorzystano opracowanie z [85], rozszerzając podany tam model o sferę eksploatacyjną elementu. Daje to kompleksowe spojrzenie na całość problemów związanych z kształtowaniem trwałości i niezawodności elementów w procesach obróbki powierzchniowej.

Z przedstawionego schematu wynika, że kształtowanie trwałości i niezawodności elementów w procesie technologicznym jest bardzo skomplikowane. Zależy to przede wszystkim od złożoności procesów konstytuujących WW i jest spowodowane:

- równoczesnym działaniem kilku parametrów fizycznych na zewnętrzną warstwę elementów,
- współdziałaniem tych parametrów na siebie,
- oddziaływaniem procesów zachodzących w WW podczas obróbki na wartość parametrów fizycznych i fizyko-chemicznych procesu obróbki (wtórne oddziaływanie skutków na przyczyny).

O przebiegu procesów zachodzących w WW podczas obróbki wnioskujemy się przede wszystkim na podstawie charakterystyki właściwości określających stan WW po obróbce. Pomiar parametrów w czasie procesu obróbki, a nawet tylko obserwacja zachodzących procesów jest na obecnym etapie rozwoju techniki pomiarowej na ogół utrudniona, a nawet niemożliwa. Dotyczy to np. pomiarów pola naprężeń, pola temperatury lub ilościowego opisywania przemian fazowych. Należy tu podkreślić, że wiele zależności przyczynowych ma charakter monotoniczny. Wreszcie nie należy zapominać o tym, że cały proces kształtowania trwałości i niezawodności elementów jest procesem stochastycznym, stąd też tylko z określonym prawdopodobieństwem można przewidywać zależności przyczynowe.



Rys. 3. Schemat kształtowania trwałości i niezawodności elementów maszyn w procesie obróbki powierzchniowej  
 Fig. 3. Scheme of formation of durability and reliability of machine elements during surface treatment process

Na podstawie schematu z rys. 3 można tworzyć dyrektywy do realizacji procesu technologicznego, zapewniając określone wymagania wobec trwałości i niezawodności. Pokazane powiązania pomiędzy poszczególnymi zbiorami, podzbiorami i parametrami mogą ułatwić budowanie sposobem doświadczalnym lub teoretyczno-doświadczalnym odpowiednich modeli matematycznych zarówno o charakterze użytkowym, jak i poznawczym.



### 2.3. Ocena dotychczasowego stanu badań i sformułowanie tez pracy

Przeprowadzona analiza literatury, związana z omawianym zagadnieniem, wykazała brak odpowiedniej podbudowy teoretycznej wiążącej warunki obróbki powierzchniowej z trwałością i niezawodnością elementów maszyn. Na ogół najwięcej materiału doświadczalnego dotyczy związków pomiędzy stanem WW i warunkami procesu technologicznego. Modele oparte na matematycznych metodach planowania eksperymentu uwzględniają najczęściej tylko niektóre wybrane parametry wejściowe i dotyczą poszczególnych, zazwyczaj pojedynczych lub nielicznej grupy materiałów obrabianych, a niekiedy jedynie określonego ich stanu, przy czym ustalone na podstawie otrzymanych wyników z badań wnioski i zależności między badanymi parametrami zawierają zazwyczaj dużą liczbę współczynników, których wartości przedstawione są z pewnymi uwarunkowaniami na wykresach lub w tablicach. Takie zawężenie problematyki badawczej wynika często z doraźnych potrzeb użytkowych lub też z ograniczonych możliwości technicznych prowadzenia eksperymentu.

Pomimo znajomości mechanizmów umocnienia i powstawania naprężeń własnych WW, dużą przeszkodą w badaniach zależności wpływu parametrów technologicznych obróbki powierzchniowej na ukonstytuowaną WW jest też niedostateczna znajomość zmian strukturalnych i fazowych, jakie zachodzą w WW podczas obróbki.

Wszystko to, w powiązaniu ze stochastycznym charakterem procesu technologicznego oraz brakiem ustalonej metodyki badań stanu WW, powoduje rozbieżności w wynikach publikowanych prac przez różne ośrodki. Wadą budowanych modeli matematycznych jest również ich mała przydatność w warunkach rzeczywistych prowadzenia procesu technologicznego.

Z reguły podstawowym miernikiem, za pomocą którego ustala się kryteria obróbki powierzchniowej, jest stan WW, który powinien charakteryzować się:

- niską chropowatością i bezkierunkową strukturą powierzchni,
- obecnością naprężeń ściskających I rodzaju i obecnością zgniotu o dużych wartościach i małym gradiencie,
- dużym rozdrobieniem ziarn materiału elementu i łagodnym przejściem tego rozdrobnienia do struktury nie zdeformowanej.

Uwzględnienie stanu WW jako podstawowego miernika w doborze sposobu obróbki powierzchniowej ma niewątpliwie uzasadnienie praktyczne. Jej parametry służą za miarę jakości użytkowej elementu, a przy niektórych sposobach obróbki mogą być wykorzystane w kontroli stabilności przebiegu procesu - bardzo ważnego warunku w kształtowaniu niezawodności elementów.

W świetle dotychczasowych badań należy stwierdzić fakt zgodności dodatniego wpływu naprężeń ściskających i umocnienia WW na wzrost odporności elementów na obciążenia zmęczeniowe. Istnieją natomiast pewne rozbieżności odnośnie do wpływu tych parametrów stanu WW na korozję. Na ogół nie rozpatruje się wpływu stanu WW na trwałość i niezawodność elementów, lecz

używa się takich określeń, jak jakość, właściwości użytkowe czy też tylko trwałość. Nie zawsze prowadzi to do ukształtowania żądanej niezawodności elementów.

Bezsprzecznie należy stwierdzić brak ścisłego wiązania kryteriów WW z czynnikami wymuszającymi, a w szczególności z czynnikami zewnętrznymi, oddziaływającymi na element w eksploatacji. Jest to jeden z ważniejszych problemów w kształtowaniu trwałości i niezawodności elementów maszyn metodami technologicznymi.

Wszystkie poczynione spostrzeżenia, wynikające z obecnego stanu wiedzy w zakresie omawianego zagadnienia, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków co do dalszych badań:

- istnieje konieczność dalszego prowadzenia badań w kierunku budowania zależności ilościowych wpływu procesu technologicznego na tworzony stan WW,
- należy rozwijać kompleksowe badania nad wpływem WW na trwałość i niezawodność elementów maszyn, mając na uwadze fakt, iż jest to bardzo złożone zagadnienie należące do nauk przyrodniczych i w związku z czym najważniejszy powinien być aspekt fizyczny procesu,
- w opracowanych modelach matematycznych wiążących warunki obróbki powierzchniowej z trwałością i niezawodnością elementów maszyn nieodzowne jest uwzględnianie rzeczywistych warunków pracy elementów, umożliwi to określenie istotnego zespołu parametrów WW, który powinien być osiągnięty w procesie obróbki powierzchniowej w celu ukształtowania żądanej niezawodności elementów, to z kolei ułatwi wybór odpowiedniego zespołu parametrów technologicznych procesu obróbki,
- dla celów praktyki przemysłowej należy opracowywać przyspieszone metody wyboru procesu technologicznego w aspekcie kształtowania trwałości i niezawodności elementów,
- w badaniach nad technologicznym kształtowaniem trwałości i niezawodności elementów maszyn w szerokim zakresie należy wykorzystywać wiedzę z zakresu mechaniki pękania. Umożliwi to uwzględnienie wpływu rzeczywistej budowy tworzywa elementów na ich niezawodność.

Przeprowadzona analiza problemu kształtowania trwałości i niezawodności elementów maszyn w procesach obróbki powierzchniowej upoważnia do podania następującej tezy pracy:

- opisywanie zależności przyczynowych pomiędzy procesem obróbki powierzchniowej a trwałością i niezawodnością elementów maszyn odbywa się przy użyciu pojęć przyjętych w naukach przyrodniczych, nie dających się jednoznacznie zdefiniować za pomocą liczb rzeczywistych, lecz za pomocą tzw. wielkości wymiarowych. Z tego względu do budowy fizykalno-matematycznych modeli wiążących wymienione wielkości, celowe jest zastosowanie analizy wymiarowej, umożliwiającej sprowadzenie rozwiązania z wielowymiarowej przestrzeni fizycznej do przestrzeni euklidesowej. Udowodnieniu tezy poświęcono rozdział 6 oraz podrozdziały 6.1 i 6.2.

Ponadto postawiono dwie tezy o znaczeniu drugorzędnym:

- spośród poznanych parametrów WW największy wpływ na trwałość i niezawodność uwzględnionej w opracowaniu klasy elementów ma wytrzymałość zmęczeniowa i odporność na korozję; udowodnieniu tej tezy poświęcono rozdział 5 oraz podrozdziały 6.4. i 6.5.
- mając na uwadze fakt istnienia potrzeby stosowania przyspieszonych metod wyboru procesu technologicznego pod kątem optymalnego kształtowania trwałości i niezawodności elementów maszyn, za celowe uznano wprowadzenie do tego celu bayesowskiej teorii decyzji. Udowodnieniu tezy tej poświęcono podrozdział 6.6.

### 3. PROGRAM I METODY BADAŃ

Jako sposoby obróbki powierzchniowej wybrano te, które najczęściej stosowane są w technologii wybranej klasy elementów, a więc decydują o ich trwałości i niezawodności. Są to:

- w zakresie obróbki ścierniej - szlifowanie, gładzenie, polerowanie i obróbka strumieniowo-ścierna,
- w zakresie obróbki umocniającej - kulkowanie naporowe i kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi,
- w zakresie obróbki erozyjnej -- obróbka elektroerozyjna i elektrochemiczna.

Program badań zakładał wykonanie całości pracy w ramach dwóch etapów. Pierwszy etap badań polegał na budowaniu jakościowych modeli matematycznych wpływu:

- obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe WW metodą analizy wymiarowej,
- parametrów WW na trwałość i niezawodność elementów maszyn.

Przeprowadzono ponadto teoretyczną analizę prognozowania trwałości i niezawodności elementów maszyn opierając się na mechanice pękania.

Etap drugi, eksperymentalny, polegał na przeprowadzeniu dodatkowych badań celem poddania opracowanych modeli w postaci zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych kontroli doświadczalnej. Eksperyment postanowiono przeprowadzić w zakresie wpływu szlifowania i kulkowania strumieniowego na wybrane parametry stanu WW. Postanowiono również zrealizować badania wpływu stabilności procesu obróbki powierzchniowej na tworzony stan WW. Badania wykonano na przykładzie kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi - typowego procesu o zmieniającej się w czasie charakterystyce.

Celem wykazania wpływu czynników zewnętrznych na niezawodność elementów wykonano badania wpływu toczenia, szlifowania, polerowania, obróbki strumieniowo-ścierniej i kulkowania strumieniowego na odporność elementów na korozję wżerową i naprężeniową. Korozja tych rodzajów szczególnie niekorzystnie wpływa na utratę właściwości użytkowych rozważanej klasy elementów.

Modele wpływu kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi na naprężenia własne WW postanowiono opracować również opierając się na metodyce wyboru bazy wymiarowej. Pozwala ona na znaczne zwiększenie dokładności otrzymanego modelu matematycznego. Wszystkie wymienione badania postanowiono przeprowadzić na próbkach.

Badania wpływu obróbki powierzchniowej na trwałość i niezawodność elementów maszyn oraz próbę zastosowania Bayesowskiej teorii decyzji do wyboru obróbki powierzchniowej przeprowadzono na łopatkach sprężarki silnika turbospalinowego. Za wyborem tych elementów do badań przemawiają dość trudne ich warunki pracy - typowe dla rozważanej w opracowaniu klasy elementów. Ponadto w procesie technologicznym łopatek stosowana jest większość sposobów obróbki powierzchniowej, uwzględnionych w pracy (z wyjątkiem kulkowania naporowego i gładzenia).

Jako parametry charakteryzujące stan WW przyjęto te, których wpływ na trwałość i niezawodność elementów jest niezaprzeczalny. Są to: naprężenia własne I rodzaju, wysokość chropowatości powierzchni  $R_a$  WW i mikrotwardość WW.

Opis stosowanych metod badań i technik pomiarowych podano w odpowiednich rozdziałach pracy.

Przyjęcie dwustapowego programu będzie umożliwiało pełne zrealizowanie postawionego celu pracy.

Rozwiązanie przedstawionych problemów wymaga wnikliwego poznania wszystkich z tym związanych zjawisk od strony fizycznej, fizyczno-chemicznej, a nawet i ekonomicznej. Stąd też zastosowanie tylko metod eksperymentalno-statystycznych w budowie modeli matematycznych mogłoby przynieść skąpe wartości poznawcze w opracowaniu tak ważnego zagadnienia, jakim jest prognozowanie niezawodności metodami technologicznymi.

#### 4. MODELOWANIE WPŁYWU OBRÓBKII POWIERZCHNIOWEJ NA STAN I WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE WARSTWY WIERZCHNIEJ METODĄ ANALIZY WYMIAROWEJ

##### 4.1. Identyfikacja wpływu procesów obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe warstwy wierzchniej

Identyfikacja wpływu procesów obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe WW polega na budowie przybliżonego opisu matematycznego tego zjawiska (modelu matematycznego), tj. wyznaczenia przybliżonej postaci zależności funkcyjnej - równania definicyjnego

$$x_0 = f(x_1, x_2 \dots x_n), \quad (12)$$

gdzie:

$x_0$  - dowolny parametr stanu lub właściwości użytkowych WW,  
 $x_1, x_2 \dots x_n$  - zbiór parametrów technologicznych danego sposobu obróbki.

Identyfikacji wymienionego procesu dokonano na trzech etapach:

Etap 1. Na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy określono zbiory parametrów technologicznych poszczególnych sposobów obróbki powierzchniowej  $x_k$  ( $k = 1, 2 \dots n$ ) oraz ustalono parametry stanu i właściwości użytkowych WW, które będą wyznaczane w modelach matematycznych. Etap ten nosi nazwę charakterystyki danego procesu.

Etap 2. Utworzono jakościowe modele matematyczne wpływu sposobów obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe WW, tzn. określono klasę funkcji opisujących te procesy z dokładnością do stałych, podlegających wyznaczeniu.

Etap 3. Przyjęto kryterium dokładności modelu (zwane kryterium jakości i identyfikacji) i poddano modele kontroli doświadczalnej. Wykonano w tym celu  $k$  pomiarów wielkości parametrów stanu WW dla założonych przedziałów zmiennych parametrów technologicznych sposobów obróbki. Za pomocą wyrównania wyników przeprowadzonych pomiarów wyznaczono przybliżone wartości parametrów.

Zauważyć należy, że zarówno parametry technologiczne procesów obróbki powierzchniowej, jak i parametry stanu oraz właściwości użytkowych WW są określonymi wielkościami fizycznymi. Dlatego wydaje się słuszne posłużenie się aparatem analizy wymiarowej w celu zbudowania odpowiednich modeli

matematycznych do opisu zależności pomiędzy tymi parametrami. Podstawą analizy wymiarowej jest twierdzenie Buckinghama, umożliwiające zastąpienie równania wymiarowego równoważnym z nim równaniem bezwymiarowym (o zmniejszonej liczbie bezwymiarowych wielkości wejściowych) [54, 58, 76, 77, 99, 107]. Zgodnie z tym twierdzeniem równanie (12), jako jednorodne wymiarowo, może być zastąpione równoważnym równaniem.

$$\pi_0 = F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_s), \quad (13)$$

gdzie:

$(\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_s)$  - zupełny układ iloczynów bezwymiarowych parametrów technologicznych sposobów obróbki powierzchniowej.

W świetle twierdzenia Buckinghama proces wpływu sposobów obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe WW opisano przez podanie:

- a)  $(s + 1) = (n + 1) - r$  iloczynów bezwymiarowych  $\pi_j$  ( $j = 0, 1, 2, 3 \dots s$ ), zwanych też liczbami kryterialnymi,
- b) zależności funkcyjnej postaci (12).

Jedynym i wyłącznym zadaniem analizy wymiarowej jest rozwiązanie problemu z a), tj. wyznaczenie zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych (etap 2). Rozwiązanie zagadnienia z b), tj. wyznaczenie analitycznej postaci operatora funkcyjnego F (etap 3) zrealizowano za pomocą przeprowadzonych badań doświadczalnych.

#### 4.2. Zbiory parametrów technologicznych obróbki powierzchniowej

W celu zbudowania jakościowych modeli matematycznych w postaci zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych, ujmujących wpływ warunków obróbki powierzchniowej na niektóre parametry stanu WW, zbudowano zbiory parametrów technologicznych poszczególnych sposobów obróbki.

Tabela 1

Zbiory parametrów technologicznych poszczególnych sposobów obróbki

A. Szlifowanie a) Podzbiór parametrów związany z warunkami obróbki	Oznaczenie	Wymiar w jednostkach SI	Wymiar w jednostkach ogólnych		
			M	K	S
1	2	4	4	5	6
1. Prędkość ściernicy	$v_s$	m/s	1	0	-1
2. Prędkość przedmiotu	$v_p$	m/s	1	0	-1

1	2	3	4	5	6
3. Posuw poprzeczny (wzdłużny, wglębny)	$P_t, P$	$\frac{m}{s}$ $\frac{m}{obr}$	1 1	0 0	-1 0
4. Głębokość szlifowania	$g$	$m$	1	0	0
5. Rodzaj cieczy chłodząco-smarującej	$C_c$	-	0	0	0
6. Sposób ostrzenia ściernicy (częstość, posuw)	$O_s$	-	0	0	0
7. Liczba przejść (roboczych, wyskrzających)	$i$	-	0	0	0
8. Stan wyważenia ściernicy	$W_s$	$kg \cdot m/s^2$	-1	1	-2
9. Sztywność układu OUPN	$J$	$kg/s^2$	0	1	-2
10. Rodzaj materiału ściernicy	$M_s$	-	0	0	0
11. Twardość ściernicy	$H_s$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
12. Struktura ściernicy	$S_s$	-	0	0	0
13. Spoivo	$S_p$	-	0	0	0
14. Rozmiar ziarna	$z$	$m$	1	0	0
15. Stan powierzchni ściernicy (np. czas pracy)	$z_s$	$s$	0	0	1
b) Podzbiór parametrów związany z obrabianym materiałem					
1. Twardość	$H_M$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
2. Struktura (np. gęstość dyslokacji)	$S_M$	$1/m^2$	-2	0	0
3. Ziarnistość (np. rozmiar ziarn)	$f_k$	$m$	1	0	0
4. Granica plastyczności	$R_e$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
5. Wytrzymałość na rozciąganie	$R_m$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
6. Stan WW po obróbce poprzedzającej (np. naprężenia lub utwardzenie)	$S'_{ww}$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
7. Moduł Younga	$E$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
8. Udarność	$U$	$kg/s^2$	0	1	-2
c) Podzbiór parametrów towarzyszących procesowi obróbki					
1. Czynniki ludzki (np. czas pracy wpływający na zmęczenie pracownika)	$f_u$	$s$	0	0	1
2. Warunki otoczenia (np. ilość ciepła)	$f_o$	$kg \cdot m^2/s^2$	2	1	-2
<b>B. Gładzenie</b>					
a) Podzbiór parametrów związanych z warunkami obróbki					
1. Prędkość obwodowa	$v_p$	$m/s$	1	0	-1
2. Prędkość liniowa	$P_t$	$m/s$	1	0	-1
3. Kąt kierunku prędkości skrawania	$\varphi_o$	$rad$	-	-	-



1	2	3	4	5	6
4. Nacisk jednostkowy	$P_m$	$kg/m.s^2$	-1	1	-2
5. Rodzaj cieczy chłodząco-smarującej (np. lepkość)	$L_s$	$m^2/s$	2	0	-1
6. Czas obróbki	$t_m$	s	0	0	1
7. Rodzaj materiału ściernego	$M_s$	wybrać parametr	( )	( )	( )
8. Rozmiar ziarna	z	m	1	0	0
9. Twardość materiału ściernego	$H_s$	$kg/m.s^2$	-1	1	-2
10. Stan powierzchni narzędzia (np. zużycie)	$z_s$	kg	1	0	0
11. Wymiary narzędzia	$W_N$	$m^2$	2	0	0
b) Podzbiór parametrów związany z obrabianym materiałem (jak w p. A)					
c) Podzbiór parametrów towarzyszący procesowi obróbki (jak w p. A)					
<b>C. Polerowanie</b>					
a) Podzbiór parametrów związanych z warunkami obróbki					
1. Prędkość polerowania	v	m/s	1	0	-1
2. Nacisk jednostkowy	$P_m$	$kg/m.s^2$	-1	1	-2
3. Prędkość posuwu	$P_t$	m/s	1	0	-1
4. Rodzaj smaru (np. lepkość)	L	$m^2/s$	2	0	-1
5. Rodzaj pasty (np. wielkość ziarna)	$P_{so}$	m	1	0	0
6. Czas obróbki	$t_m$	s	0	0	1
b) Podzbiór parametrów związany z obrabianym materiałem (jak w p. A)					
c) Podzbiór parametrów towarzyszący procesowi obróbki (jak w p. A)					
<b>D. Obróbka strumieniowo-ścierna</b>					
a) Podzbiór parametrów związanych z warunkami obróbki					
1. Ciśnienie strumienia cieczy (prędkość strumienia)	$P_c$ ( $V_c$ )	$kg/m.s^2$ (m/s)	-1 (1)	1 (0)	-2 (-1)
2. Rozmiar ziarna	z	m	1	0	0
3. Rodzaj materiału ziarna	$z_R$	( )	( )	( )	( )
4. Koncentracja ziarna w cieczy	$K_s$	$kg/m^2.s^2$	-2	1	-2
5. Czas obróbki	$t_m$	s	0	0	1
6. Kąt natrysku	$\alpha_n$	rad	0	0	0
7. Zużycie ziarna	$z_z$	m	1	0	0
8. Długość strumienia roboczego	$l_o$	m	1	0	0

1	2	3	4	5	6
b) Podzbiór parametrów związany z obrabianym materiałem (jak w p. A)					
c) Podzbiór parametrów towarzyszący procesowi obróbki (jak w p. A)					
<b>E. Kulkowanie strumieniowe</b>					
a) Podzbiór parametrów związany z warunkami obróbki					
1. Ciśnienie strumienia roboczego (prędkość strumienia)	$P_R$ ( $V_R$ )	$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$ ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )	-1 (1)	1 (0)	-2 (-1)
2. Średnica kulek	$d_k$	m	1	0	0
3. Ciężar kulek (ciężar właściwy)	$C_k$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2}$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2}$	1 -2	1 1	-2 -2
4. Czas obróbki	$t_m$	s	0	0	1
5. Długość strumienia roboczego	$l_r$	m	1	0	0
6. Kąt natrysku	$\alpha_n$	rad	0	0	0
7. Zużycie kulek	$z_d$	m $\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$	1 1	0 1	0 -2
b) Podzbiór parametrów związany z obrabianym materiałem (jak w p. A)					
c) Podzbiór parametrów towarzyszący procesowi obróbki (jak w p. A)					
<b>F. Kulkowanie naporowe</b>					
a) Podzbiór parametrów związany z warunkami obróbki					
1. Siła nagniatania	P	$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$	1	1	-2
2. Posuw	p	m/s	1	0	-1
3. Promień zaokrąglenia narzędzia	R	m	1	0	0
4. Liczba przejść	i	-	0	0	0
5. Liczba elementów nagniatających	$I_n$	-	0	0	0
6. Chropowatość części roboczej narzędzia	$R_{an}$	m	1	0	0
7. Stosunek średnicy zaokrąglenia narzędzia do średnicy obrabianego przedmiotu	$\frac{D_N}{d_p}$	-	0	0	0
8. Rodzaj smaru (np. lepkość)	$L_s$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	2	0	-1
9. Sztywność układu	J	$\frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$	0	1	-2

1		2	3	4	5	6		
b)	Podzbiór parametrów związanych z obrabianym materiałem (jak w p. A)							
c)	Podzbiór parametrów towarzyszący procesowi obróbki (jak w p. A)							
<b>G. Obróbka elektroerozyjna</b>								
a)	Podzbiór parametrów związanych z warunkami obróbki	Oznaczenie	Wymiar w jednostkach SI	Wymiar w jednostkach ogólnych				
				M	K	S	A	T
	1. Napięcie źródła prądu	$U_o$	$kg \cdot m^2 / s^3 \cdot A$	2	1	-3	-1	0
	2. Napięcie graniczne	$U_g$	$kg \cdot m^2 / s^3 \cdot A$	2	1	-3	-1	0
	3. Opór w obwodzie ładowania	$R$	$kg \cdot m^2 / s^3 \cdot A^2$	2	1	-3	-2	0
	4. Opór w szczelinie roboczej	$R_w$	$kg \cdot m^2 / s^3 \cdot A^2$	2	1	-3	-2	0
	5. Natężenie prądu wyładowania	$I_w$	A	0	0	0	1	0
	6. Indukcyjność	$L$	$m^2 \cdot kg / s^2 \cdot A^2$	2	1	-2	-2	0
	7. Pojemność	$C$	$A^2 \cdot s^4 / m^2 \cdot kg$	-2	-1	4	2	0
	8. Czas wyładowania	$t_N$	s	0	0	1	0	0
	9. Czas ładowania	$t_e$	s	0	0	1	0	0
	10. Częstość wyładowań	$f$	1/s	0	0	-1	0	0
	11. Kształt wyładowań	$k$	-	0	0	0	0	0
	12. Rodzaj dielektryku	$G_d$	-	0	0	0	0	0
	13. Zanieczyszczenie dielektryku	$Z_d$	$kg/m^3$	-3	1	0	0	0
	14. Grubość szczeliny iskrowej	$s$	m	1	0	0	0	0
	15. Prędkość przepływu dielektryku	$V_d$	m/s	1	0	-1	0	0
	16. Rodzaj materiału erody	$M_e$	-	0	0	0	0	0
	17. Kształt i wymiar erody	$W_e$	-	0	0	0	0	0
b)	Podzbiór parametrów związanych z obrabianym materiałem							
	1. Twardość	$H_M$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2	0	0
	2. Temperatura topnienia	$T_t$	K	0	0	0	0	1
	3. Temperatura wrzenia	$t_M$	K	0	0	0	0	1
	4. Pojemność cieplna	$C_M$	$kg \cdot m^2 / s^2 \cdot K$	2	1	-2	0	-1
	5. Sztywność układu OUPN	$J$	$kg/s^2$	0	1	-2	0	0
	6. Stan WW od obróbki poprzedzającej (np. naprężenia lub utwardzenie)	$S'_{ww}$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2	0	0
c)	Podzbiór parametrów towarzyszący procesowi obróbki							
	1. Czynniki ludzki (np. temperatura)	$f_u$	K	0	0	0	0	1
	2. Warunki otoczenia (np. ilość ciepła)	$f_o$	$kg \cdot m^2 / s^2$	2	1	-2	0	0

H. Obróbka elektrochemiczna		Oznaczenie	Wymiar w jednostkach SI	Wymiar w jednostkach ogólnych				
				M	K	S	A	T
a) Podzbiór parametrów związanych z warunkami obróbki								
1.	Gęstość prądu	$j_A$	$A/m^2$	-2	0	0	1	0
2.	Napięcie zasilania	$U_o$	$kg \cdot m^2/s^3 \cdot A$	2	1	-3	-1	0
3.	Szczelina pomiędzy elektrodami	$s$	$m$	1	0	0	0	0
4.	Czynna powierzchnia anody	$F$	$m^2$	2	0	0	0	0
5.	Współczynnik stratności polaryzacji	$k_p$	-	0	0	0	0	0
6.	Skład chemiczny elektrolitu	$S_e$	-	0	0	0	0	0
7.	Temperatura elektrolitu	$t_e$	K	0	0	0	0	1
8.	Koncentracja elektrolitu	$K_e$	-	0	0	0	0	0
9.	Właściwa przewodność elektryczna elektrolitu	$W$	$A^2 \cdot s^3/m^3 \cdot kg$	-3	-1	3	2	0
10.	Kształt narzędzia anody	$K_N$	-	0	0	0	0	0
11.	Wielkość szczeliny bocznej	$S_b$	$m$	1	0	0	0	0
12.	Chropowatość narzędzia	$R_N$	$m$	1	0	0	0	0
b) Podzbiór parametrów związanych z obrabianym materiałem								
1.	Kształt i wielkość obrabianego przedmiotu	$K_M$	-	0	0	0	0	0
2.	Właściwość elektrochemiczna obrabianego materiału	$n$	-	0	0	0	0	0
3.	Ciepła właściwy obrabianego materiału	$\delta_M$	$kg/m^3$	-3	1	0	0	0
4.	Sztynność układu OUPN	$J$	$kg/s^2$	0	1	-2	0	0
5.	Stan WW od obróbki poprzedzającej (np. naprężenia)	$S'_{ww}$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2	0	0
c) Podzbiór parametrów towarzyszący procesowi obróbki								
1.	Czynnik ludzki (np. temperatura)	$f_u$	K	0	0	0	0	1
2.	Warunki otoczenia (np. ilość ciepła)	$f_o$	$kg \cdot m^2/s^2$	2	1	-2	0	0

Przedstawione zbiory parametrów technologicznych poszczególnych sposobów obróbki ujmują, według autora, te parametry, których wpływ na konstituowanie WW jest poznany. W miarę wzbogacania wiedzy w omawianym zagadnieniu, zbiory parametrów na pewno będą się zmieniać zarówno pod względem liczebności, jak i rodzaju.

4.3. Modele parametrów warstwy wierzchniej po obróbce powierzchniowej w postaci układów iloczynów bezwymiarowych

Metodykę tworzenia zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych przedstawiono na przykładzie szlifowania płaszczyzn. Za zmienne zależne przyjęto parametry stanu i właściwości użytkowych WW, tj.  $R_u$ ,  $G_w$ ,  $H_u$ ,  $Z$  i  $Z_x$ . Zmiennymi niezależnymi są parametry zbioru technologicznego szlifowania. Równanie definicyjne (12) przyjmuje postać

$$\left. \begin{matrix} R_u \\ G_w \\ H_u \\ Z \\ Z_x \end{matrix} \right\} = f(v_s, p_t, v_p, \epsilon, C_o, O_s, i, j, W_s, M_s, H_s, S_s, S_p, z, z_s, H_M, S_M, f_k, R_e, R_m, S'_{ww}, E, U, f_u, f_o). \quad (14)$$

Spośród wielu istniejących metod wyznaczenia zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych [54,76,77,99,107] wybrano metodę opisaną w pracy [77], która jest optymalna ze względu na wygodę prowadzenia eksperymentu, ponieważ sterowalne wielkości wejściowe można rozdzielić w ten sposób, że każda wystąpi oddzielnie w jednej i tylko jednej liczbie kryterialnej i w pierwszej potędze. Macierz wymiarowa jest następująca:

		Pn																			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$G_w$	$R_u$	$v_s$	$v_p$	$p_t$	$\epsilon$	$j$	$z$	$H_s$	$H_M$	$f_k$	$R_e$	$R_m$	$S'_{ww}$	$W_s$	$f_u$	$f_o$	$S_M$	$E$	$U$	$z_s$	
$H_u$																					
M	-1	1	1	1	1	1	0	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	0	2	-2	-1	0	0
K	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
S	-2	0	-1	-1	0	0	-2	0	-2	-2	0	-2	-2	-2	-2	1	-2	0	-2	-2	1

Należy zauważyć, że wszystkie założenia stosowalności metody macierzowej są spełnione, gdyż

- a)  $m = 3$ ,  $n = 19$ , czyli  $m < n + 1 = 20$ ,
- b)  $r = 3 = m$ , tj. macierz nie jest "osobliwa",
- c)

$$W = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ -2 & -2 & 1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0,$$

czyli niezerowy wyznacznik stopnia  $r = 3$  można wyjąć z ostatnich prawych trzech kolumn macierzy.

Zgodnie z twierdzeniem Buckinghama, równanie (14) opisujące rozpatrywany proces jest równoważne z równaniem bezwymiarowym

$$\pi_0 = F(\pi_1, \pi_2 \dots \pi_j), \tag{15}$$

gdzie:

$\pi_j$  ( $j = 0, 1, 2 \dots 16$ ) - zupełny układ liczb kryterialnych zmiennych  $R_a, v_a, p \dots f_0, S_M,$

Uwzględniając parametr  $R_a$  można napisać:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_6 - P_7 - P_8 + P_9 - P_{10} - P_{11} - P_{12} + P_{13} + 2P_{15} - 2P_{16} - P_{17} = 0$$

$$P_5 + P_7 + P_8 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{15} + P_{17} + P_{18} = 0, \\ -P_1 - P_2 - 2P_5 - 2P_7 - 2P_8 - 2P_{10} - 2P_{11} - 2P_{12} - 2P_{13} + P_{14} - 2P_{15} - 2P_{17} - 2P_{18} + P_{19} = 0.$$

Przyjmując  $P_j$  ( $j = 0, 1, 2, \dots 16$ ) za swobodne niewiadome, rozwiązuje się układ względem związanych niewiadomych  $P_{17}, P_{18}, P_{19}$  i otrzymuje się

$$P_{17} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_6 - P_7 - P_8 + P_9 - P_{10} - P_{11} - P_{12} + P_{13} + 2P_{15} - 2P_{16},$$

$$P_{18} = -P_0 - P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5 - P_6 - P_9 - 2P_{13} - 3P_{15} + 2P_{16},$$

$$P_{19} = P_1 + P_2 - P_{14}.$$

Dla swobodnych niewiadomych  $P_j$  ( $j = 0, 1, 2 \dots 16$ ) przyjmuje się następujące ciągi wartości liczbowych:

$$P_{j0} = 1.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.$$

$$P_{j1} = 0.1.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.$$

$$P_{j15} = 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1.0.$$

$$P_{j16} = 0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1.$$

Zatem macierz rozwiązań w rozważanym zagadnieniu przyjmie postać

-	R <sub>a</sub>	v <sub>s</sub>	v <sub>p</sub>	p <sub>t</sub>	ε	j	z	H <sub>s</sub>	H <sub>M</sub>	f <sub>k</sub>	R <sub>e</sub>	R <sub>m</sub>	S' <sub>ww</sub>	W <sub>s</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>o</sub>	S <sub>M</sub>	E	U	z <sub>s</sub>
π <sub>0</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
π <sub>1</sub>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1
π <sub>2</sub>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1
π <sub>3</sub>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
π <sub>4</sub>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
π <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
π <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
π <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
π <sub>8</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
π <sub>9</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
π <sub>10</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
π <sub>11</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0
π <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
π <sub>13</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-2	0
π <sub>14</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1
π <sub>15</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	-3	0
π <sub>16</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-2	2	0

Z macierzy rozwiązań otrzymuje się następujący zupełny układ liczb kryterialnych dla badanego procesu

$$\pi_0 = R_a^1 E^1 U^{-1} = \frac{R_a E}{U},$$

$$\pi_1 = v_s^1 E^1 U^{-1} z_s^1 = \frac{v_s E z_s}{U},$$

.....

$$\pi_{16} = S_M^1 E^{-2} U^2 = \frac{S_M U^2}{E^2},$$

$$\pi_{17} = C_0,$$

$$\pi_{18} = O_s,$$

$$\pi_{19} = i,$$

$$\pi_{20} = M_s,$$

$$\pi_{21} = S_s,$$

$$\pi_{22} = S_p,$$

Liczby kryterialne są liczbami bezwymiarowymi. Zgodnie z twierdzeniem Buckingham'a, równanie kryterialne procesu ma postać

$$\pi_0 = F(\pi_1, \pi_2 \dots \pi_{22}), \quad (16)$$

czyli

$$\frac{R_a E}{U} = F\left(\frac{v_s E z_s}{U}, \frac{v_p E z_s}{U}, \frac{p_t E}{U}, \frac{g E}{U}, \frac{j z E}{U}, \frac{H_s}{E}\right),$$

$$\frac{H_M}{E}, \frac{f_k E}{U}, \frac{R_e}{E}, \frac{R_M}{E}, \frac{S'_{ww}}{E}, \frac{W_s E}{U^2}, \frac{f_u U}{z_s}, \frac{f_o E^2}{U^3},$$

$$\frac{S_M U^2}{E^2}, C_o, O_s, i, M_s, S_s, S_p). \quad (17)$$

W podobny sposób wyznaczono równanie kryterialne dla  $G_w, H_u, Z$  i  $Z_k$  i otrzymano

$$\frac{G_w}{E}, \frac{H_u}{E}, \frac{Z}{E} = F\left(\frac{v_s E z_s}{U}, \frac{v_p E z_s}{U}, \frac{p_t E}{U}, \frac{g E}{U}, \frac{z E}{U}, \frac{H_s}{E}\right),$$

$$\frac{H_M}{E}, \frac{f_k E}{U}, \frac{R_e}{E}, \frac{R_M}{E}, \frac{S'_{ww}}{E}, \frac{W_s E}{U^2}, \frac{f_u}{z_s}, \frac{f_o E^2}{U^3},$$

$$\frac{S_M U^2}{E^2}, C_o, O_s, i, M_s, S_s, S_p). \quad (18)$$

W przypadku zużycia korozyjnego za wskaźnik zużycia przyjęto ubytek wagowy materiału elementu. W związku z tym równanie kryterialne przyjmie postać



$$\frac{Z_r}{U z_s^2} = F\left(\frac{v_s E z_s}{U}, \frac{v_p E z_s}{U}, \frac{p_t E}{U}, \frac{\epsilon E j}{U}, \frac{z E}{U}, \frac{H_s}{E}, \frac{H_M}{E}, \frac{f_k E}{U}, \frac{R_e}{E}, \frac{R_m}{E}, \frac{S'_{ww}}{E}, \frac{W_s E}{U^2}, \frac{f_u}{z_s}, \frac{f_o E^2}{U^3}, \frac{S_M U^2}{E^2}, C_o, O_s, i, M_s, S_s, S_p\right). \quad (19)$$

Modele matematyczne parametrów warstwy wierzchniej po pozostałych sposobach obróbki powierzchniowej, przedstawione w formie równań kryterialnych, mają następujące postacie:

- dla gładzenia

$$R_a \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}} = F\left(v_p f_u \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, \varphi^o, \frac{t_m}{f_u}, M_s, S_M \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S_{ww}^2}}, \frac{U}{\sqrt[3]{S_{ww}^2 f_o}}, \frac{H_s}{R_e}, \frac{R_m}{E}, \frac{p_m}{H_M}, \frac{p_t f_u}{z_s}, \frac{z}{f_k}, \frac{L_s f_k}{W_N}\right). \quad (20)$$

$$\frac{\sigma_w}{S'_{ww}}, \frac{H_u}{S'_{ww}}, \frac{Z}{S'_{ww}} = F\left(v_p f_u \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, \varphi^o, \frac{t_m}{f_u}, M_s, S_M \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S_{ww}^2}}, \frac{U}{\sqrt[3]{S_{ww}^2 f_o}}, \frac{H_s}{R_e}, \frac{R_m}{E}, \frac{p_m}{H_M}, \frac{p_t f_u}{z_s}, \frac{z}{f_k}, \frac{L_s f_k}{W_N}\right). \quad (21)$$

$$\frac{Z_r}{f_K^2 \sqrt[3]{f_o S_{ww}^2}} = F\left(v_p f_k \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, \varphi^o, \frac{t_m}{f_u}, M_s, S_M \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S_{ww}^2}}, \frac{U}{\sqrt[3]{S_{ww}^2 f_o}}, \frac{H_s}{R_e}, \frac{R_m}{E}, \frac{p_m}{H_M}, \frac{p_t f_u}{z_s}, \frac{z}{f_k}, \frac{L_s f_k}{W_N}\right). \quad (22)$$

- dla polerowania

$$R_a \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}} = F \left( \frac{t_m}{f_k}, \frac{E}{S'_{ww}}, \frac{U}{\sqrt[3]{S'_{ww}{}^2 f_o}}, \frac{p_m}{H_M}, \frac{R_e}{R_m}, \frac{p_t f_u}{f_k}, \frac{V f_u}{p_{sc}}, L f_u S_M \right). \quad (23)$$

$$\frac{G_w}{S'_{ww}}, \frac{H_u}{S'_{ww}}, \frac{Z}{S'_{ww}} = F \left( \frac{t_m}{f_k}, \frac{E}{S'_{ww}}, \frac{U}{\sqrt[3]{S'_{ww}{}^2 f_o}}, \frac{p_m}{H_M}, \frac{R_e}{R_m}, \frac{p_t f_u}{f_k}, \frac{V f_u}{p_{sc}}, L f_u S_M \right). \quad (24)$$

$$\frac{Z_r}{f_u^2 \sqrt[3]{S'_{ww}{}^2 f_o}} = F \left( \frac{t_m}{f_k}, \frac{E}{S'_{ww}}, \frac{U}{\sqrt[3]{S'_{ww}{}^2 f_o}}, \frac{p_m}{H_M}, \frac{R_e}{R_m}, \frac{p_t f_u}{f_k}, \frac{V f_u}{p_{sc}}, L f_u S_M \right). \quad (25)$$

- dla obróbki strumieniowo-ściernej

$$R_a \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}} = F \left( \frac{t_m}{f_u}, \alpha_n, \frac{E}{S'_{ww}}, \frac{p_c}{H_M}, z_R, z \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, \frac{z_z}{l_c}, \frac{k_s S_M f_o}{S'_{ww}{}^2}, \frac{f_k S'_{ww}}{U}, \frac{R_e}{R_m} \right). \quad (26)$$

$$\frac{G_w}{S'_{ww}}, \frac{H_u}{S'_{ww}}, \frac{z}{S'_{ww}} = F \left( \frac{t_m}{f_u}, \alpha_n, \frac{E}{S'_{ww}}, \frac{p_c}{H_M}, z_R, z \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, \frac{z_z}{l_c}, \frac{k_s S_M f_o}{S'_{ww}{}^2}, \frac{f_k S'_{ww}}{U}, \frac{R_e}{R_m} \right). \quad (27)$$

$$\frac{\frac{|Z|}{r}}{f_u^2 \sqrt[3]{S'_{ww} f_o}} = F\left(\frac{t_m}{f_u}, \alpha_n, \frac{E}{S_{ww}}, \frac{P_o}{H_M}, z_R, \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, \frac{z_z}{I_o}, \frac{k_s S_M f_o}{S_{ww}^2}, \frac{f_k S'_{ww}}{U}, \frac{R_e}{R_m}\right). \quad (28)$$

- dla kulkowania strumieniowego

$$R_a \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}} = F\left(\frac{t_m}{f_u}, \alpha_n, S_M \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S'_{ww}}}, \frac{E}{S_{ww}}, \frac{P_R}{H_M}, \frac{d_k}{I_r}, \frac{z_d}{f_k}, \frac{R_e}{R_m}, \frac{C_K U}{S'_{ww} f_o}\right). \quad (29)$$

$$\frac{\sigma_w}{S'_{ww}}, \frac{H_u}{S'_{ww}}, \frac{Z}{S'_{ww}} = F\left(\frac{t_m}{f_u}, \alpha_n, S_M \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S'_{ww}}}, \frac{E}{S_{ww}}, \frac{P_R}{H_M}, \frac{d_k}{I_r}, \frac{z_d}{f_k}, \frac{R_e}{R_m}, \frac{C_K U}{S'_{ww} f_o}\right). \quad (30)$$

$$\frac{\frac{r}{f_u^2 \sqrt[3]{S_{ww}^2 f_o}}}{R_m}, \frac{C_K U}{S'_{ww} f_o} = F\left(\frac{t_m}{f_u}, \alpha_n, S_M \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S'_{ww}}}, \frac{E}{S_{ww}}, \frac{P_R}{H_M}, \frac{d_k}{I_r}, \frac{z_d}{f_k}, \frac{R_e}{R_m}, \frac{C_K U}{S'_{ww} f_o}\right). \quad (31)$$

- dla kulkowania naporowego

$$R_a \frac{S'_{ww}}{U} = F\left(i, I_n, \frac{D_N}{d_p}, f_u f_o, \frac{P f_o}{P}, \frac{R}{R_{aN}}, \frac{S_M}{f_k}, \frac{j}{H_M}, \frac{R_m}{E}, \frac{L_s S'_{ww} R_e}{U^2 f_o}\right). \quad (32)$$

$$\frac{\sigma_w}{S'_{ww}}, \frac{H_u}{S'_{ww}}, \frac{|Z|}{S'_{ww}} = F\left(i, I_n, \frac{D_N}{d_p}, f_u f_o, \frac{P f_o}{U P}, \frac{R}{R_{aN}}, \frac{S_M}{f_k}, \frac{j}{H_M}, \frac{R_m}{E}, \frac{L_s S'_{ww} R_e}{U^2 f_o}\right). \quad (33)$$

$$\frac{Z_r f_o^2}{U} = F(i, I_n, \frac{D_N}{d_p}, f_u f_o, \frac{P f_o}{U_p}, \frac{R}{R_{aN}}, \frac{S_M}{f_k}, \frac{j}{H_M}, \frac{R_m}{E}, \frac{L_a S'_{ww} R_a}{U^2 f_o}). \quad (34)$$

- dla obróbki elektroerozyjnej

$$R_a \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}} = F(I_w \sqrt{\frac{L}{f_o}}, \frac{j}{\sqrt[3]{S'_{ww} f_o}}, k, \frac{z_d}{C L} \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S'_{ww}}}, G_d, S \sqrt{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, M_e, W_e, \frac{H_M}{S'_{ww}}, \frac{t_e C_M}{f_o}, \frac{U_o}{U_g}, \frac{R}{R_w}, \frac{f_u}{T_t}, \frac{t_e t_w}{L C}, \frac{f}{V_d \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}}). \quad (35)$$

$$\frac{G_w}{S'_{ww}}, \frac{H_u}{S'_{ww}}, \frac{Z}{S'_{ww}} = F(I_w \sqrt{\frac{L}{f_o}}, \frac{j}{\sqrt[3]{S'_{ww} f_o}}, k, \frac{z_d}{C L} \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S'_{ww}}}, G_d, S \sqrt{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, M_e, W_e, \frac{H_M}{S'_{ww}}, \frac{t_e C_M}{f_o}, \frac{U_o}{U_g}, \frac{R}{R_w}, \frac{f_u}{T_t}, \frac{t_e t_w}{L C}, \frac{f}{V_d \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}}). \quad (36)$$

$$\frac{Z_r}{L C S'_{ww} f_o} = F(I_w \sqrt{\frac{L}{f_o}}, \frac{j}{\sqrt[3]{S'_{ww} f_o}}, k, \frac{z_d}{C L} \sqrt[3]{\frac{f_o^2}{S'_{ww}}}, G_d, S \sqrt{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, M_e, W_e, \frac{H_M}{S'_{ww}}, \frac{t_e C_M}{f_o}, \frac{U_o}{U_g}, \frac{R}{R_w}, \frac{f_u}{T_t}, \frac{t_e t_w}{L C}, \frac{f}{V_d \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}}). \quad (37)$$

- dla obróbki elektrochemicznej

$$R_a \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}} = F(\frac{j}{\sqrt[3]{S'_{ww} f_o}}, k_p, S_e, \frac{t_e}{f_u}, K_e, \frac{W U_o}{J_A} \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, K_N, K_M, n, \frac{\gamma_M j_A^2 U_o^2}{S'_{ww} j}, \frac{a}{a_b}, \frac{F}{K_N} \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}). \quad (38)$$

$$\frac{Z}{S'_{ww}} = F\left(\sqrt[3]{\frac{1}{S'_{ww}{}^2 f_o}}, k_p, S_o, \frac{t_e}{f_u}, K_o, \frac{W U_o}{J_A} \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, K_N, K_M, n, \right. \\ \left. \frac{\delta_M J_A^2 U_o^2}{S'_{ww} J}, \frac{s}{s_b}, \frac{F}{R_N} \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}\right). \quad (39)$$

$$Z_r \frac{J_A^2 U_o^2}{S'_{ww} f_o} = F\left(\sqrt[3]{\frac{1}{S'_{ww}{}^2 f_o}}, k_p, S_o, \frac{t_e}{f_u}, K_o, \frac{W U_o}{J_A} \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}, K_N, K_M, n, \right. \\ \left. \frac{\delta_M J_A^2 U_o^2}{S'_{ww} J}, \frac{s}{s_b}, \frac{F}{R_N} \sqrt[3]{\frac{S'_{ww}}{f_o}}\right). \quad (40)$$

Postać operatora funkcyjnego  $F$  w przedstawionych równaniach może być wyznaczona wyłącznie za pomocą wyrównania wyników badań fizycznych, aproksymując zależność np. jednomianem potęgowym postaci

$$Y_o = a_o X_1^{a_1} X_2^{a_2} \dots X_u^{a_u} = a_o \prod_{k=1}^u X_k^{a_k}, \quad (41)$$

gdzie:

$a_o, a_1 \dots a_k$  - stałe podlegające wyznaczeniu, lub wielomianem postaci

$$Y_o = b_o + \sum_{i=1}^m b_i X_i, \quad (42)$$

gdzie:

$b_o \dots b_1$  - stałe podlegające wyznaczeniu.

Istnieje możliwość aproksymacji przedstawionych zależności również do innych postaci wielomianów, co przedstawiono w pracy [11].

Szczegółową metodykę planowania i przeprowadzania badań eksperymentalnych przedstawiono w pracach [68,83,84,89,115]. W niniejszym opracowaniu natomiast, w rozdziale 6, przedstawiono badania eksperymentalne wpływu wybranych sposobów obróbki powierzchniowej na chropowatość  $R_a$  i naprężenia własne  $\sigma_w$  w WW. Głównym zadaniem planowanych badań eksperymentalnych jest

wykazanie możliwości zastosowania analizy wymiarowej w opracowywanym modelu matematycznym, nie kładąc nacisku na wybór samego programu badań doświadczalnych. Opracowane modele matematyczne parametrów WW w postaci układów iloczynów bezwymiarowych charakteryzują się mniejszą liczbą czynników niezależnych o 3 lub 4 w porównaniu ze zbiorami parametrów technologicznych każdego sposobu obróbki, co na pewno ułatwia opracowanie ilościowych modeli matematycznych, szczególnie z wykorzystaniem maszyn matematycznych. Należy podkreślić i to, że postać układu iloczynów bezwymiarowych uzależniona jest od wyboru tzw. bazy wymiarowej. Dobierając różne możliwe bazy wymiarowe dla danego zbioru parametrów technologicznych można otrzymać również różne postacie zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych, a więc postaci najbardziej adekwatnej do rozpatrywanych warunków procesu obróbki. Sposób budowy układu iloczynów bezwymiarowych za pomocą wyboru bazy wymiarowej przedstawiono w podrozdziale 6.2.

## 5. MODELE MATEMATYCZNE WPLYWU PARAMETRÓW WARSTWY WIERZCHNIEJ NA TRWAŁOŚĆ I NIEZAWODNOŚĆ ELEMENTÓW MASZYN

### 5.1. Ogólne związki trwałości i niezawodności elementów maszyn z parametrami warstwy wierzchniej

Zasadniczy problem kształtowania trwałości i niezawodności elementów maszyn na podstawie utworzonej WW w procesie obróbki powierzchniowej sprowadza się do ukonstytuowania takich jej parametrów, ażeby w eksploatacji zapewniły żądany poziom trwałości i niezawodności elementów. W związku z tym opierając się na ukonstytuowanych parametrach WW można też pośrednio prognozować trwałość i niezawodność elementów. Dla przykładu w [69] wprowadzono pojęcie jakości WW określonej zależnością

$$Q_T = 1 - P(W_\Omega - U_\Omega)^{M_\Omega}, \quad (43)$$

gdzie:

$M_\Omega$  - współczynnik korelacyjny,

$W_\Omega$  - zbiór parametrów WW utworzonej w procesie technologicznym.

$U_\Omega$  - zbiór parametrów WW UCW, dla których jakość WW jest najwyższa i wynosi 1.

Współczynnik korelacyjny  $M_\Omega$  uwzględnia zmiany parametrów WW, które występują w eksploatacji. Zakładając określony poziom niezawodności elementów w określonym przedziale czasu  $(0, \tau)$  można eksperymentalnie wyznaczyć wartość  $Q_T$ , jaka musi być zagwarantowana w procesie technologicznym.

Bardziej szczegółowy opis kształtowania trwałości i niezawodności elementów w zależności od ukonstytuowanej WW przedstawiony zostanie zgodnie z metodyką podaną w pracy [24]. Stochastyczny charakter właściwości materiału oraz procesów obróbki zgrubnej, cieplnej i powierzchniowej jest przyczyną tego, że funkcje  $c_i(0)$  ( $i=1, 2 \dots n$ ) opisujące ukształtowane parametry WW można traktować jako zmienne losowe. I wówczas niezawodność elementu ze względu na  $n$  parametrów po zakończeniu procesu obróbki powierzchniowej wyniesie

$$R^{(n)}(0) = \int_{c_1(d)}^{c_1(\xi)} \dots \int_{c_n(d)}^{c_n(\xi)} f(0, x_1, x_2 \dots x_n) dx_1, dx_2 \dots dx_n, \quad (44)$$

gdzie:

$f(0, x_1, x_2, \dots, x_n)$  - gęstość rozkładu prawdopodobieństwa parametrów WW,  
 $c_1(g), c_1(d)$  - graniczne wartości parametrów WW określone warunkami technicznymi.

Podczas eksploatacji na element oddziałują czynniki wymuszające o charakterze losowym, które mogą być opisane funkcjami  $w_j(t)$  i dla ustalonego  $t$  można traktować je jako zmienne losowe.

Jeżeli spośród możliwych przebiegów funkcji zespołu czynników wymuszających  $W_t$  w przedziale  $(0, \bar{t})$  wyróżni się konkretny przebieg  $W_{u\bar{t}} = W_0(t)$ ,  $0 < t < \bar{t}$ , to można mówić o prawdopodobieństwie zaistnienia takiego przebiegu  $P_t\{W\}$ . Podobnie dla wyróżnionego przebiegu zespołu parametrów WW  $C_{u\bar{t}} = C_0(t)$  otrzyma się  $P_t\{C\}$ .

Zbiór  $C_t$  dzieli się na dwa rozłączne podzbiory  $C_1$  i  $C_2$  takie, że do zbioru  $C_1$  zalicza się wszystkie te przebiegi funkcji parametrów WW w przedziale  $(0, \bar{t})$ , które warunkują poprawną pracę elementu w danych warunkach, zaś do zbioru  $C_2$  wszystkie pozostałe przebiegi C. Jeżeli przebieg  $C \in C_1$ , to oznacza, że element pracuje poprawnie przez ten przedział czasu. Prawdopodobieństwo  $R(t)$  zajścia takiego zdarzenia charakteryzuje niezawodność elementu w przedziale czasu  $(0, \bar{t})$

$$R(t) = R(0) \int_{C_1} P_t\{C\} \delta C = R(0) \int_{C_1} \delta C \int_{W_t} P_t\{C/W\} P_t\{W\} \delta W, \quad (45)$$

gdzie:

$P_t\{C/W\}$  - warunkowe prawdopodobieństwo przebiegu  $C_0(t)$  w przedziale  $(0, \bar{t})$  pod warunkiem, że czynniki wymuszające mają w tym przedziale przebieg  $W_0(t)$ .

Trwałość elementu można natomiast wyznaczyć ze wzoru

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (46)$$

Przedstawiona zależność w pełni opisuje niezawodność elementu, uwzględniając istotne składowe związane z jego użytkowaniem i niezawodność początkową będącą wynikiem procesu technologicznego. Jednak z powodu trudności w ocenie prawdopodobieństwa  $P_t\{W\}$  oraz  $P_t\{C/W\}$  istnieje niemożność zastosowania w praktyce przedstawionego modelu. Stąd też na ogół w opisie niezawodności elementów często nie uwzględnia się przebiegów czynników wymuszających. Bierze się natomiast pod uwagę zależność niezawodności od długości przedziału czasu  $(0, \bar{t})$  oraz od zmian w czasie parametrów charakteryzujących stan zdadności elementu.



Dla elementu o wyróżnionych dwóch stanach: zdatności i niezdatności, opisu takiego można dokonać tak, jak pokazano w [24]. Jeżeli  $F(x_1, x_2 \dots x_n, t)$  jest dystrybuantą  $n$ -wymiarowej zmiennej losowej  $c(t)$  opisującej stan elementu w chwili  $t$ , tzn.

$$F(x_1, x_2 \dots x_n, t) = P\{c_1(t) < x_1, c_2(t) < x_2 \dots c_n(t) < x_n\}, \quad (47)$$

przy czym:  $c(t) = [c_1(t), c_2(t) \dots c_n(t)]$ . Każdemu stanowi  $x = (x_1, x_2 \dots x_n)$  można przypisać jedność, gdy odpowiada on zdatności elementu, oraz zero - w przypadku przeciwnym. Interesująca tutaj wartość oczekiwana wynosi

$$E[b\{c(t)\}] = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} b(x_1, x_2 \dots x_n) dF(x_1, x_2 \dots x_n), \quad (48)$$

gdzie:

$b$  - funkcja przyporządkowująca poszczególnym składowym stan elementu liczby 1 lub 0.

Ponadto gdy przyjmie się założenie, że jeżeli element był w stanie zdatności w chwili  $\tilde{t}$ , to pozostawał w stanie zdatności przez przedział czasu  $(0, \tilde{t})$  i jeżeli  $c(t) = 1$ , gdy w chwili odpowiadającej liczbie  $t$  element jest w stanie zdatności oraz  $c(t) = 0$  w przypadku przeciwnym, to otrzymana wartość oczekiwana jest prawdopodobieństwem tego, że element będzie w stanie zdatności w rozpatrywanym przedziale czasu. Prawdopodobieństwo to charakteryzuje zatem niezawodność elementu w przedziale  $(0, \tilde{t})$  w zależności od przebiegu zmian parametrów.

Uwzględnienie w opisie pełnych przebiegów funkcji  $c_i$ , charakteryzujących właściwości elementu, prowadzi do konieczności posługiwania się  $n$ -wymiarowymi dystrybuantami  $F(x_1, x_2 \dots x_n, t)$ . Aby uniknąć trudności matematycznych przy wyznaczaniu charakterystyk niezawodności, na ogół rezygnuje się z takiego opisu, poprzestając na wyznaczeniu prawdopodobieństwa powstania uszkodzenia elementu w przedziale czasu  $(0, \tilde{t})$ . Uzyskany opis jest prosty matematycznie, nie ujmuje jednakże w jawnej postaci wpływu na niezawodność przebiegów czynników wymuszających oraz przebiegów poszczególnych funkcji  $c_i$ , charakteryzujących właściwości elementu. Opis taki wyraża tylko zmianę niezawodności elementu w czasie, jako wynik zmiany stanu elementu spowodowany zmianą właściwości jego parametrów WW.

Z przedstawionych danych wynika, że właściwe ukształtowanie trwałości i niezawodności elementów warunkuje dobra znajomość prawdopodobieństwa  $P_t\{W\}$  i  $P_t\{C/W\}$ . Szczególnie ważne jest poznanie funkcji zmiany parametrów  $c_i(t)$  WW, zwanej również funkcją eksploatacyjną WW [52]. Jest to istotny warunek nie tylko przy określaniu niezawodności elementów, ale i w zakresie ustalania zbioru parametrów WW, znacząco wpływających na niezawodność.

Innym istotnym problemem jest badanie wpływu ukonstytuowanych parametrów  $c_1(0)$  WW w procesie obróbki powierzchniowej na funkcję eksploatacyjną WW. Pozwoli to na takie ukształtowanie wyodrębnionego zespołu parametrów  $c_1(0)$  WW w procesie technologicznym, ażeby zespół ten gwarantował wymagany przebieg zmian parametrów  $c_1(t)$  w eksploatacji elementu. Właściwie ukonstytuowany zespół parametrów  $c_1(0)$ , stanowiący stan WW po procesie technologicznym, stanowi o jakości użytkowej elementu. Miarą tego są właściwości użytkowe WW.

Rozwiązywanie tych problemów jest bardzo ważne w aspekcie właściwego ukierunkowania badań nad wpływem procesu technologicznego na tworzenie WW, szczególnie pod kątem uzyskiwania wymaganego zbioru parametrów, o charakterystyce zapewniającej wymagane właściwości użytkowe WW, a zarazem uzyskanie zadanej trwałości i niezawodności elementu zarówno po zakończeniu procesu obróbki, jak i w czasie eksploatacji.

Zgodnie z przedstawionym zakresem pracy (rozdział 3), modelowanie wpływu parametrów WW na trwałość i niezawodność elementów zawiązano do elementów maszyn pracujących w warunkach obciążeń zmęczeniowych. Uwzględniono również wpływ środowiska korozyjnego na pracę elementów.

W obecnej chwili stan wiedzy o zmęczeniu materiałów konstrukcyjnych pozwala na ogół na prognozowanie trwałości i niezawodności elementów maszyn. Obliczenia takie najczęściej dotychczas prowadzone były przy założeniu braku defektów w badanych materiałach, gdzie zmęczeniowość opisywana jest tzw. krzywą Wöhlera. Brak uwzględniania w obliczeniach zmęczeniowych rzeczywistej budowy wewnętrznej materiałów, w tym w szczególności różnego rodzaju wtrąceń, szczelin, mikropęknięć itp., doprowadza zazwyczaj do dużych rozbieżności pomiędzy przewidywaną i rzeczywistą trwałością elementów maszyn, co w przypadku skomplikowanych urządzeń technicznych (mosty, samoloty, statki kosmiczne) nie może być dopuszczalne. Z tych też powodów intensywnie rozwijana jest nowa gałąź nauki z pogranicza mechaniki i materiałoznawstwa - mechanika pękania, uwzględniająca właśnie prawie wszystkie czynniki mające wpływ na zjawiska zmęczenia w materiałach i przez to też umożliwiającą dokładniejsze opisywanie trwałości elementów maszyn.

Mając jednak na uwadze fakt, że w dalszym ciągu częściej stosowane jest prognozowanie trwałości i niezawodności elementów według klasycznej wytrzymałości zmęczeniowej aniżeli na podstawie mechaniki pękania, w pracy uwzględniono obydwa kierunki badań.

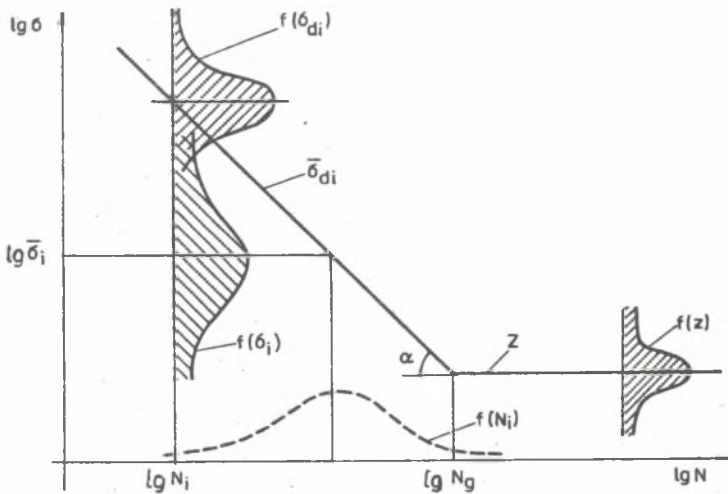
## 5.2. Trwałość i niezawodność elementów maszyn bez uwzględnienia zużycia korozyjnego

Przedstawiono tu wybrane modele opisujące trwałość i niezawodność elementów maszyn pracujących w warunkach ograniczonej i trwałej wytrzymałości zmęczeniowej dla obciążenia ustabilizowanego (ustalonego) i niustabilizowanego.

lizowanego (nie ustalonego) [100]. Jako parametr właściwości użytkowych W<sub>W</sub>, wpływający w sposób istotny na trwałość i niezawodność elementów, przyjęto objętościową wytrzymałość zmęczeniową Z.

5.2.1. Praca elementów maszyn w warunkach obciążenia ustabilizowanego

Poziom naprężeń od obciążenia zmienia się tu w pewnym przedziale i zmiany te są głównie spowodowane przyczynami technologicznymi (rozrzut wymiarów rzeczywistych) oraz pewnymi zmianami warunków oddziaływania czynnika roboczego, np. obciążenie łopatek w stacjonarnej turbinie parowej nie ustaloną strugą pary wodnej. Zmiana naprężeń zazwyczaj aproksymowana jest rozkładem normalnym. Średnią wartość naprężeń określa zależność (rys. 4)



Rys. 4. Wykres zmęczeniowy Wöhlera w układzie logarytmicznym  
 Fig. 4. Woehler's fatigue diagram in logarithmic lay-out

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i, \quad (49)$$

gdzie:

N - liczba cykli naprężeń.

Natomiast odchylenie standardowe

$$S_{\sigma_1} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \bar{\sigma}_1)^2} \quad (50)$$

i współczynnik wariancji

$$v_{\sigma} = \frac{S_{\sigma_1}}{\bar{\sigma}_1} \quad (51)$$

W [93] wyróżniono trzy przypadki obciążenia elementu:

- w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej  $\bar{\sigma}_1 > Z$ ,
- w zakresie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej  $\bar{\sigma}_1 < Z$ ,
- w zakresie pośrednim, tj. między ograniczoną i trwałą wytrzymałością zmęczeniową  $\bar{\sigma}_1 = Z$ .

Zakładają stacjonarność i ergodyczność procesu oraz i to, że zmienne losowe  $\sigma_{di}$  i  $\sigma_1$  są niezależne i mają rozkłady normalne, trwałość i niezawodność elementów można obliczyć następująco:

a) Dla przypadku, kiedy  $\bar{\sigma}_1 > Z$

Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy, wynikające z warunku  $\sigma_{di} > \sigma_1$ , czyli  $\Delta\sigma = \sigma_{di} - \sigma_1 > 0$  określa zależność [81, 94]

$$R(N_1) = 0,5 + \phi \left[ \frac{\Delta\bar{\sigma}}{S_{\Sigma}} \right] \quad (52)$$

gdzie:

$\sigma_{di}$  - naprężenie dopuszczalne odpowiadające liczbie cykli obciążenia  $N_1$ ,

$$\Delta\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{di} - \bar{\sigma}_1,$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\sigma_{di}}^2 + S_{\sigma_1}^2},$$

$S_{\sigma_{di}}$  - odchylenie standardowe naprężeń dopuszczalnych.

Jeżeli przyjmie się naprężenia dopuszczalne jako wielkość zdeterminowaną, to wówczas wzór (52) przyjmie postać

$$R(N_1) = 0,5 + \phi \left[ \frac{\bar{\sigma}_{di} - \sigma_1}{S_{\sigma_1}} \right] \quad (53)$$

Wartość  $\bar{\sigma}_{di}$  można określić z równania krzywej Wöhlera [93]

$$\bar{\sigma}_{di}^m N_i = Z^m N_g, \quad (54)$$

stąd

$$\bar{\sigma}_{di} = \sqrt[m]{\frac{Z^m N_g}{N_i}} = Z \sqrt[m]{\frac{N_g}{N_i}}. \quad (55)$$

Uwzględniając to

$$\Delta \bar{\sigma} = Z \sqrt[m]{\frac{N_g}{N_i}} - \bar{\sigma}_1 \quad (56)$$

1

$$R(N_i) = 0,5 + \phi \frac{\left[ Z \sqrt[m]{\frac{N_g}{N_i}} - \bar{\sigma}_1 \right]}{\sqrt{S_{\bar{\sigma}_{di}}^2 + S_{\bar{\sigma}_1}^2}}. \quad (57)$$

Trwałość elementu wyrażona liczbą cykli obciążenia, obliczona ze wzoru (54) wyniesie

$$E(N_i) = \left( \frac{Z}{\bar{\sigma}_1} \right)^m N_g \quad (58)$$

ponieważ dla tego przypadku  $\bar{\sigma}_{di} = \bar{\sigma}_1$ ,

gdzie:

$N_g$  - graniczna liczba cykli obciążenia,

$m$  - wykładnik potęgowy równy odtangensowi nachylenia krzywej Wöhlera we współrzędnych logarytmicznych.

Wartości wykładnika  $m$  zależą przede wszystkim od rodzaju materiału, kształtu elementu i właściwości WW. Dla polerowanych elementów z różnego rodzaju stali  $m = 9 - 12$ , zaopatrzonych w najoczęściej spotykane karby  $m = 6 - 10$ , po różnych zabiegach powierzchniowego ulepszania  $m = 18 - 20$  [57].

Znając częstość drgań można obliczyć czas pracy  $t$  elementu ze wzoru

$$t = \frac{N}{\nu}. \quad (59)$$

Zależności (57) i (58) charakteryzują się stosunkowo prostą budową i mogą być stosowane tam, gdzie zależy na szybkim, przybliżonym szacowaniu trwałości i niezawodności elementów, szczególnie w badaniach porównawczych podczas rozpatrywania wpływu sposobów obróbki powierzchniowej na kształtowanie się zarówno trwałości, jak i niezawodności elementów.

b) Praca elementów w zakresie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej, tj. kiedy  $\bar{\sigma}_1 < Z$

Niezawodność elementów w tym przypadku można wyznaczyć na podstawie zależności podanej w [81,94], która przyjmie postać

$$R(N_1) = 0,5 + \phi \left[ \frac{Z - \bar{\sigma}_1}{S_Z^2 + S_{\bar{\sigma}_1}^2} \right] \quad (60)$$

Nie eksponuje się tu trwałości elementu, ponieważ przy nieuwzględnieniu problemu jego starzenia się może on teoretycznie pracować poprawnie, mając nieograniczoną liczbę cykli obciążenia.

c) Praca elementów przy obciążeniu, kiedy zachodzi warunek  $\bar{\sigma}_1 = Z$

Mogą wystąpić w tym przypadku naprężenia  $\bar{\sigma}_1 \geq Z$ . Zgodnie z [93] do obliczeń trwałości i niezawodności elementu należy brać pod uwagę naprężenia  $\bar{\sigma}_1 > Z$ , obniżając jednak wytrzymałość zmęczeniową  $Z$  o wartość

$$\Delta Z = Z S K \left( \frac{\sigma_a}{Z} - 1 \right) \frac{1}{\frac{\sigma_a}{Z} - S^2} \quad (61)$$

w przypadku naprężeń o stałej amplitudzie  $\sigma_a$  oraz

$$Z = Z K \sum_{i=1}^n \sigma_i \left( \frac{\sigma_i}{Z} - 1 \right) \frac{1}{\frac{\sigma_i}{Z} - \sigma_i^2} \quad (62)$$

kiedy naprężenia charakteryzują się zmienną amplitudą,

gdzie:

$K$  - współczynnik charakteryzujący materiał i stopień koncentracji naprężeń, dla stali hartowanych  $K = 1$ ,

$S = \frac{n_a}{N_a}$  - stopień uszkodzenia,

$n_a$  - liczba cykli naprężeń o wartości  $\sigma_a$ ,

$N_a$  - graniczna liczba cykli naprężeń, dla której następuje uszkodzenie elementu obciążonego naprężeniem  $\sigma_a$ .

Niezawodność elementów określa zależność (57), a trwałość zależność (58). Zależności (57), (58) i (60) charakteryzują się prostą postacią. Wyraźnie widać tu wpływ wytrzymałości  $Z$  na kształtowanie się trwałości i niezawodności elementów. Stąd też można je zastosować szczególnie do przybliżonej oceny wpływu obróbki powierzchniowej na trwałość i niezawodność elementów.

### 5.2.2. Praca elementów maszyn w warunkach obciążenia niestabilizowanego

W przypadku obciążenia niestabilizowanego elementu do obliczenia jego trwałości przyjmuje się na ogół hipotezę kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, którą można wyrazić wzorem

$$\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (63)$$

gdzie:

- $n_i$  - liczba zmian naprężeń o wartości  $\sigma_i$ ,
- $N_i$  - graniczna liczba cykli zmian naprężeń, dla której następuje uszkodzenie elementu obciążonego naprężeniem  $\sigma_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, q$ , przy czym  $\sigma_i > Z$ .

Doświadczalna weryfikacja liniowej hipotezy wykazała jednak występowanie znacznych rozbieżności z przyjętą zależnością (63). Rozbieżność pomiędzy trwałością obliczoną na podstawie hipotezy a trwałością uzyskaną w badaniach wynika głównie z dwóch powodów:

- pomijania wpływu historii obciążenia, tj. kolejności występowania i czasu trwania poszczególnych amplitud widm obciążeń,
- pomijania niszczącego wpływu obciążeń leżących poniżej trwałej wytrzymałości zmęczeniowej [19, 57, 87, 100, 101]:

Stąd też wzór (63) proponuje się w postaci

$$\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = a, \quad (64)$$

gdzie:

- $a$  - przyjmuje wartości od 0,8 do 32.

Zależności (63) i (64) zostały uogólnione przez Yokabori-Ichikawe do postaci nieliniowej [121]

$$\sum_{i=1}^q \alpha_i \left(\frac{n_i}{N_i}\right)^{\lambda_i} + 1 = 1, \quad (64a)$$

gdzie:

$\alpha_i, \lambda_i$  - współczynniki zależne od właściwości materiałowych i poziomu obciążenia w cyklu zmęczeniowym.

Dla konkretnego przypadku technologicznego wybór zależności powinien być poparty identyfikacyjnymi badaniami doświadczalnymi.

Ważną sprawą jest uzyskanie informacji o rozkładzie naprężeń występujących w elemencie podczas pracy urządzenia. W tym celu stosowane są obecnie dwie zasadnicze grupy metod:

- metody rejestracji zapisów przebiegu zmian naprężeń,
- metody teorii funkcji losowych.

W obu przypadkach zakłada się stacjonarność i ergodyczność przebiegu naprężeń w materiale elementu, a także przyjmuje się, że rozkłady naprężeń są rozkładami Gaussa.

Ogól wartości amplitudy naprężeń i liczby ich cykli występowania określa się często w niewielkim przedziale czasu pracy elementu. W związku z tym ogólna liczba cykli obciążenia elementów składać się będzie z  $\lambda$  jednakowych bloków, a wzór (63) przyjmie postać [100]

$$\lambda \sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} = a. \quad (65)$$

Uwzględniając z kolei równanie krzywej Wöhlera (54) można określić niszczącą dla danego elementu liczbę bloków obciążenia  $\lambda_k$

$$\lambda_k = \frac{a Z^m N_c}{\sum_{i=1}^q \sigma_i^m n_i}. \quad (66)$$

Uszkodzenie elementu można tu określić jako prawdopodobieństwo przewyższenia liczby cykli  $N_e$  w czasie eksploatacji nad liczbą cykli  $N_c$ , odpowiadającą zniszczeniu elementu z określonym prawdopodobieństwem  $p$ , pod wpływem zmiennych naprężeń opisanych odpowiednim widmem

$$\lg N_e = \lg(N_c)_p = \lg \bar{N}_e + x_p \cdot (\lg N_c), \quad (67)$$



gdzie:

- $N_c$  - całkowita liczba cykli obciążenia elementu,
- $x_p$  - kwantyl rozkładu zmiennej losowej naprężeń,
- $^s(\lg N_c)$  - odchylenie standardowe zmiennej losowej cykli naprężeń,
- $\bar{N}_c$  - średnia liczba cykli obciążenia elementu.

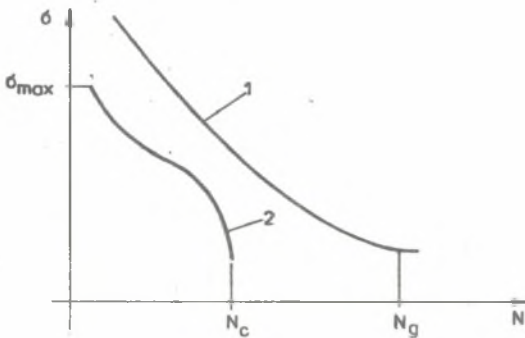
W [19] na podstawie równania krzywej Wöhlera wyprowadzono wzór na naprężenia zastępcze  $\sigma_z$ , równoważne z danym widmem naprężeń działających w określonym okresie eksploatacji elementu. Postać wzoru jest następująca

$$\sigma_z = \frac{1}{m\sqrt{a}} \sqrt[m]{\frac{\lambda}{N_c} \sum_{i=1}^q \sigma_i^m n_i} \quad (68)$$

Jeżeli obciążenia elementów mają przebiegi ciągłe, to wówczas

$$\sigma_z = \frac{1}{m\sqrt{a}} \sqrt[m]{\frac{N_c}{N_c} \int_Z^{\sigma_{\max}} \sigma_i^m f(\sigma_i) d\sigma_i} \quad (69)$$

gdzie oznaczenia jak na rys. 5.



Rys. 5. Schemat do wyznaczania zapasu wytrzymałości:  
1-krzywa wytrzymałości, 2-dystrybuanta rozkładu naprężeń [19]

Fig. 5. Diagram for determination of strength reserve:  
1 - strength curve, 2 - stress distribution function [19]

Uszkodzenie elementu powinno nastąpić wtedy, gdy naprężenie zastępcze zbliży się do granicy wytrzymałości, tj.

$$\sigma_z = Z, \quad (70)$$

czyli

$$Z = \frac{1}{m \sqrt{a}} \sqrt{\frac{\lambda N_c}{N_g} \int_Z^{\sigma_{\max}} \sigma_1^m f(\sigma_1) d\sigma_1} \quad (71)$$

Z zależności tej można obliczyć trwałość elementu

$$E(N_c) = \frac{Z^m N_g a}{\lambda \int_Z^{\sigma_{\max}} \sigma_1^m f(\sigma_1) d\sigma_1} \quad (72)$$

lub dla nieciągłych przebiegów obciążenia

$$E(N_c) = \frac{Z^m N_g a}{\lambda \sum_{i=1}^q \sigma_i^m n_i} \quad (73)$$

Niezawodność elementu natomiast wyniesie

$$R(N_i) = 0,5 + \phi \left[ \frac{N_i - E(N_c)}{S_Z} \right] \quad (74)$$

Jak wspomniano uprzednio, większym problemem jest tu uzyskiwanie właściwych informacji o rozkładzie naprężeń aniżeli ocena trwałości i niezawodności elementów. Od właściwej analizy naprężeń działających na element zależy dokładność oceny jego trwałości i niezawodności.

W [105] podano też sposób obliczenia niezawodności elementów na podstawie energii wewnętrznej skumulowanej w elemencie. Warunkiem uszkodzenia elementu jest osiągnięcie przez wykonaną pracę wewnętrzną krytycznej wartości  $A_{kr}$ , przy czym

$$A_{kr} = N \Delta A, \quad (75)$$

gdzie:

$N$  - liczba cykli obciążenia,

$\Delta A$  - praca wewnętrzna przypadająca na jeden cykl obciążenia.

Wartość  $A_{kr}$  można określić z wykresu obciążenia, natomiast wartość wykonywanej pracy wewnętrznej  $\Delta A$  może być obliczona w przybliżeniu jako powierzchnia równoważnej elipsy o półosiach  $\sigma_1$  i  $\sigma_1/E$  i wyniesie ona

$$\Delta A = \frac{\pi \sigma_1^2}{E}, \quad (76)$$

gdzie:

$E$  - moduł Younga,

Dla przybliżonej oceny niezawodności elementów można przyjąć, że niezawodność związana jest z wartością istniejącego zapasu energii  $A_z$ , który można jeszcze zużytkować podczas zwiększania obciążenia:

$$R(N) = \frac{A_z}{A_{kr}} = 1 - \frac{N\Delta A}{A_{kr}} \quad (77)$$

Uwzględniając równanie (76) otrzymuje się

$$R(N) = 1 - \frac{\pi \sigma^2}{A_{kr} E} N t \quad (78)$$

Dla  $\frac{N}{N_{kr}} < 0,1$

$$R(N) \approx 1 - \lambda N \approx e^{-\lambda N}, \quad (79)$$

gdzie:

$$\lambda = \frac{\pi \sigma^2}{A_{kr} E}$$

Podana metoda określania niezawodności elementów ma tę wadę, że istnieje trudność wyodrębnienia energii  $A_{kr}$  powodującej pęknięcie zmęczeniowe [57]. Na ogół brak jest informacji o zastosowaniu tej metody w praktyce.

Inną zależność na określenie trwałości i niezawodności można też znaleźć w pracy [74]

$$R(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \frac{T - \bar{T}}{\gamma \sqrt{2} \bar{t} T}, \quad (80)$$

gdzie:

$$E(T) = \frac{\sigma \bar{\sigma}}{k} \frac{\zeta}{M_C} \lambda_{kr} - \text{trwałość elementu,}$$

$\sigma, \bar{\sigma}, k$  - stałe materiałowe,

$M_C$  - funkcja Mellina,

$\lambda_{kr}$  - wartość krytyczna mikrospektań materiału,

$\bar{t}$  - wartość średnia czasu pomiędzy dwoma impulsami naprężeń,

$$\gamma_{\text{def}} = \frac{M_{2C}}{M_C - 1} - \text{parametr zależny od rozkładu naprężeń losowych.}$$

Zależność (80) może stwarzać trudności w stosowaniu w praktyce, ponieważ wymaga znajomości dużej liczby stałych materiałowych i dokładnej analizy widma naprężeń. Ponadto brak tu wyraźnego wpływu wytrzymałości  $Z$  na kształtowanie się funkcji  $R(t)$ .

Podczas analizy modeli trwałości i niezawodności elementów w aspekcie ich zużycia zmęczeniowego nie sposób też nie wspomnieć pracy H. Tomaszka [111, 112]. Na ogół zakłada się tam proces zniszczenia obejmujący inicjację mikropęknięcia i zniszczenie elementu pod wpływem obciążenia. Przyjęto też opisywanie impulsów obciążenia procesem Poissona.

Prawdopodobieństwo tego, że element będzie w chwili czasu  $t$  w stanie zdatności, określano następująco [111]

$$R(t) = \int_0^d U(t, z) dz = \int_0^d e^{-c_1 t} e^{-c_2 t} \bar{U}(t, z) dz. \quad (81)$$

Natomiast funkcja

$$U(t, z) = e^{-ct} \frac{1}{\sqrt{2 \pi at}} e^{-\frac{(z - bt)^2}{2at}}, \quad (82)$$

gdzie:

$d$  - długość szczeliny zmęczeniowej

$C = C_1 + C_2$ ,

$C_1 = \lambda Q P_t$ ,

$C_2 = \lambda(1 - P_t)$ ,

$a = \lambda(1 - Q) P_t P_1 h^2 + \lambda(1 - Q) P_t P_2 4h^2$ ,

$b = \lambda(1 - Q) P_t P_1 h + (1 - Q) P_t P_2 2h$ ,

$\lambda$  - intensywność pojawiania się impulsów obciążenia,

$Q$  - prawdopodobieństwo zniszczenia w wyniku działania pojedynczego impulsu,

$P_t$  - prawdopodobieństwo inicjacji pęknięć do chwili czasu  $t$ ,

$P_1$  - prawdopodobieństwo, że w wyniku działania impulsu pęknięcie wzrosło o wartość  $h$ ,

$P_2$  - prawdopodobieństwo, że w wyniku działania impulsu pęknięcie wzrosło o wartość  $2h$ ,

$t$  - czas działania impulsów.

Nieco inną postać wzoru na niezawodność elementu podano w opracowaniu [112] z uwzględnieniem impulsów obciążenia od tzw. twardego lądowania samolotu. Jest ona następująca

$$R(t) = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi \frac{a \lambda h^2}{1+t} z}} e^{-2 \frac{a \lambda h^2}{1+t} z} dz, \quad (83)$$

gdzie:  $a$  - stała zależna od strony fizycznej zjawiska,  
 $h$  - wzrost pęknięcia dla 1 twardego lądowania.  
 Pozostałe wielkości jak we wzorze (81).

Wydaje się, iż przedstawiona metoda oceny niezawodności elementów, aczkolwiek uwzględnia rozwój szczeliny zmęczeniowej, wymaga znajomości dużej liczby dodatkowych prawdopodobieństw związanych z pracą elementu. Łączy się to z posiadaniem bogatego materiału związanego zarówno z charakterem naprężeń, jak i charakterem samego elementu. Brak jawnego wpływu wytrzymałości zmęczeniowej  $Z$  na niezawodność elementu czyni wzór (83) mało przydatnym do oceny wpływu procesu technologicznego na kształtowanie się niezawodności elementów.

### 5.3. Trwałość i niezawodność elementów maszyn z uwzględnieniem zużycia korozyjnego

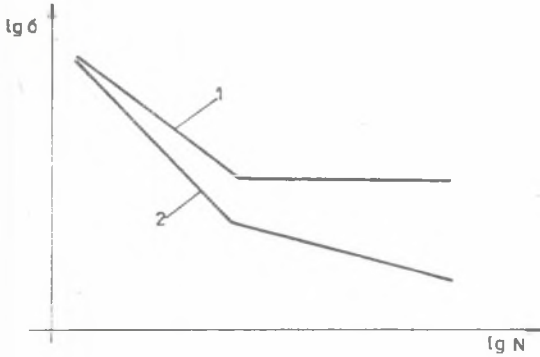
Na skutek działania czynników zewnętrznych, w tym głównie korozji, następuje zmniejszenie się wytrzymałości zmęczeniowej elementów w czasie ich eksploatacji (rys.6). Dotychczas nie ma opracowanych jednoznacznych zależności na określenie tego spadku wytrzymałości. Na ogół proponuje się jego wyznaczenie doświadczalnie [52, 96].

W zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej wpływ korozji można uwzględnić współczynnikiem  $m$ . Jego wartość należy określić z równania krzywej Wöhlera

$$\sigma_{d11}^m N_{i1} = \sigma_{d12}^m N_{i2}, \quad (84)$$

stąd

$$m = \frac{\lg \frac{N_{i2}}{N_{i1}}}{\lg \frac{\sigma_{d11}}{\sigma_{d12}}}. \quad (85)$$



Rys. 6. Wykres zmęczeniowy elementów:  
1-bez uwzględnienia zużycia korozyjnego, 2-z uwzględnieniem zużycia korozyjnego [52]

Fig. 6. Fatigue diagram:

1- without consideration of corrosive wear 2- in consideration of corrosive wear [52]

Wartości  $\sigma_{d1}$  i  $\sigma_{d2}$  podlegają wyznaczeniu doświadczalnemu. Trwałość i niezawodność można określić ze wzorów podanych w podrozdziale 5.2.

W zakresie trwałej wytrzymałości zmęczeniowej można stosować zależność opartą na hipotezie Dakina Malmłowa [34]

$$Z_t = Z_0 e^{-Bt}, \quad (86)$$

gdzie:

t - czas eksploatacji elementu,

B - współczynnik podlegający doświadczalnemu wyznaczeniu.

Współczynnik B można określić ze wzoru (86):

$$B = \frac{\ln \frac{Z_0}{Z_{t1}}}{t_1}, \quad (87)$$

gdzie:

$Z_{t1}$  - wytrzymałość zmęczeniowa elementu wyznaczona po czasie eksploatacji  $t_1$ .

Na podstawie wzoru (86) można również obliczyć trwałość elementu. Dla chwili, kiedy  $\sigma_i = Z_t$

$$E(T) = \frac{\ln \frac{Z_0}{\sigma_i}}{B}. \quad (88)$$

Zakładając stacjonarność procesu starzenia elementu, jego niezawodność można obliczyć ze wzoru

$$R(t) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{Z_t - \bar{\sigma}_i}{\sqrt{S_Z^2 + S_{\bar{\sigma}_i}^2}} \right]. \quad (89)$$

W przypadku natomiast kiedy proces jest niestacjonarny

$$R(t) = 0,5 + \phi \left[ \frac{Z_t - \bar{\sigma}_1}{S_Z^2(t) + S_{\bar{\sigma}_1}^2} \right] \quad (90)$$

Bardzo często w praktyce zmianę wytrzymałości zmęczeniowej opisuje się funkcją liniową w postaci

$$Z_b = Z_o - at \quad (91)$$

lub też funkcją [116]

$$Z_t = Z_o - at^{\alpha}, \quad (92)$$

gdzie:

$a$  - prędkość procesu starzenia,

$\alpha$  - współczynnik.

Trwałość elementu można określić ze wzorów (91) i (92) stosując podobne rozumowanie, co w przypadku zależności (88):

$$E(T) = \frac{Z_o - \bar{\sigma}_1}{a} \quad (93)$$

lub

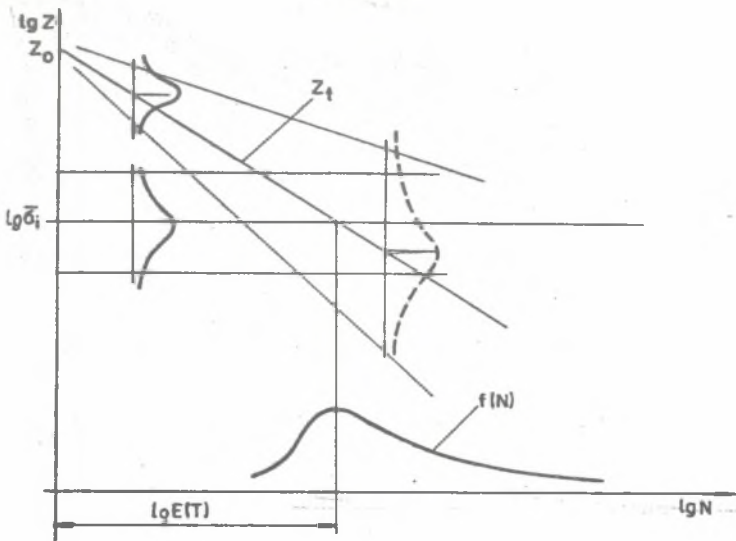
$$E(T) = \sqrt{\frac{Z_o - \bar{\sigma}_1}{a}} \quad (94)$$

Z kolei niezawodność dla procesu stacjonarnego można obliczyć ze wzoru (89). Natomiast w przypadku niestacjonarności procesu starzenia elementu (rys. 7) można skorzystać z następującej zależności [81, 94, 116]

$$R(t) = 0,5 - \phi \left[ \frac{\bar{\sigma}_1 - Z_o - at}{S_{\bar{\sigma}_1}^2 + S_Z^2 + S_a^2 t^2} \right] \quad (95)$$

i

$$R(t) = 0,5 - \phi \left[ \frac{\bar{\sigma}_1 - Z_o - at^{\alpha}}{S_{\bar{\sigma}_1}^2 + S_Z^2 + S_a^2 t^{2\alpha}} \right] \quad (96)$$



Rys. 7. Schemat powstawania uszkodzenia elementów w przypadku niestacjonarnego procesu starzenia

Fig. 7. Scheme of generation of element failure in case of unstationary ageing process

Na ogół wszystkie przedstawione wzory mogą być stosowane do oceny wpływu procesu technologicznego na trwałość i niezawodność elementów, uwzględniając bowiem one wpływ procesu obróbki nie tylko na wytrzymałość początkową  $Z_0$ , ale i na jej spadek w czasie eksploatacji elementu.

#### 5.4. Prognozowanie trwałości i niezawodności elementów maszyn na podstawie mechaniki pękania

Przykład obliczania trwałości elementu na podstawie mechaniki pękania przedstawiono w opracowaniu [120]. Metoda oparta jest na śledzeniu zmiany długości szczeliny zmęczeniowej w czasie i przedstawia się następująco. Doświadczalnie dla danego materiału elementu wyznacza się na próbkach prędkość rozwoju szczeliny zmęczeniowej  $\frac{da}{dN}$  w funkcji zakresu współczynnika intensywności naprężenia  $\Delta K$ . Następnie dla danej geometrii konstrukcji elementu oraz konfiguracji obciążeń zewnętrznych względem potencjalnej szczeliny ustala się związek między współczynnikami intensywności naprężenia, który opisuje stan naprężenia w najbardziej niebezpiecznym obszarze, tj. w pobliżu wierzchołka szczeliny, a parametrami takimi, jak naprężenie nominalne, rozmiary części konstrukcyjnej oraz wielkość początkowa defektu. Dla płyty szerokości  $2b$ , zawierającej centralną szczelinę długości  $2a$  umieszczoną normalnie w stosunku do osi obciążenia rozciągającego  $\sigma$ , zakres współczynnika  $\alpha$  intensywności naprężeń ma postać

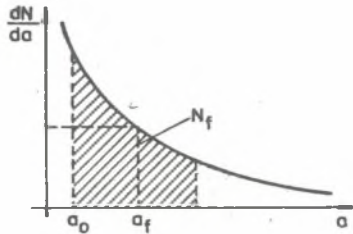


$$\Delta K = \Delta \sigma \left( \pi a \sec \frac{\pi}{2b} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (97)$$

gdzie:

$\Delta \sigma$  - naprężenia normalne.

Mając wyznaczoną prędkość rozwoju szczeliny  $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$  i współczynnik intensywności naprężeń ze wzoru (97), należy w dalszej kolejności na podstawie tych danych zbudować wykres  $\frac{dN}{da} = f(a)$ , zwany gęstością cykliczną [120]. Otrzymana krzywa (rys. 8) ma taką właściwość, że pole powierzchni zawarte między krzywą, osią odciętych oraz dwiema rzędnymi odpowiadającymi początkowej  $a_0$  oraz krytycznej  $a_f$  długości szczeliny, jest równe trwałości elementu i wynosi



Rys. 8. Zależność  $\frac{dN}{da}$  w funkcji długości szczeliny zmęczeniowej

Fig. 8. Dependence  $\frac{dN}{da}$  versus fatigue fissure length

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{dN}{da} da = \int_{a_0}^{a_f} f(a) da. \quad (98)$$

Inny sposób obliczania trwałości elementu polega na obliczaniu prędkości rozwoju szczeliny zmęczeniowej według wzoru Parisa

$$\frac{da}{dN} = D(\Delta K)^q, \quad (99)$$

gdzie:

$D$  i  $q$  - stałe materiałowe.

Gęstość cykliczna przyjmuje tu postać

$$\frac{dN}{da} = D^{-1} (\Delta K)^{-q}. \quad (100)$$

Po wstawieniu wyrażenia (97) w miejsce  $\Delta K$  otrzymuje się

$$\frac{dN}{da} = D^{-1} (\Delta \sigma)^{-q} \left( \pi a \sec \frac{\pi a}{2b} \right)^{-q/2} \quad (101)$$

a trwałość elementu wyniesie

$$N_f = D^{-1} (\Delta \sigma)^{-q} \int_{a_0}^{a_f} (\pi a)^{-q/2} \left( \sec \frac{\pi a}{2b} \right)^{-q/2} da. \quad (102)$$

Górna granica całki odpowiada tu progowi propagacji katastrofalnej, a zatem jest uzależniona od odporności na zniszczenie  $\sigma_d$  elementu w następujący sposób

$$\sigma_{\max} \left( \pi a_f \sec \frac{\pi a_f}{2b} \right)^{1/2} = \sigma_d. \quad (103)$$

W granicznym przypadku, gdy szerokość tarczy<sup>x)</sup> jest dużo większa od długości szczeliny, z równania (102) otrzymuje się

$$N_f = \frac{2D^{-1} (\Delta \sigma)^{-q}}{q-2} \left[ a_0^{(2-q)/2} - a_f^{(2-q)/2} \right] \quad (104)$$

lub też po uwzględnieniu związku (103)

$$N_f = \frac{2D^{-1} (\Delta \sigma)^{-q}}{q-2} \left[ a_0^{(2-q)/2} - \frac{\sigma_d^2}{\sigma_{\max}^2} a_f^{(2-q)/2} \right]. \quad (105)$$

Wszystkie przytoczone obliczenia zostały przeprowadzone dla stałej amplitudy obciążenia. Opis procesu zmęczenia dla zmiennej amplitudy obciążenia jest znacznie trudniejszy, aczkolwiek jest stosowany w zagadnieniach praktycznych.

Traktując jako zmienne losowe wielkości  $\frac{da}{dN}$ ,  $\sigma_d$ ,  $\sigma_{\max}$  i zakładając rozkłady normalne ich występowania, niezawodność elementu można określić jako prawdopodobieństwo przeniesienia określonych cykli obciążenia  $N_1$  dla danego obciążenia  $\sigma_1$ , czyli

<sup>x)</sup> Rozważanym elementem jest tarosa.

$$R(N_{\perp}) = 0,5 + \phi \left[ \frac{E(N_f) - N_{\perp}}{S_{Nf}} \right] \quad (106)$$

Wpływ parametru  $Ww$ , tj. wytrzymałości zmęczeniowej na trwałość  $E(N)$  i niezawodność  $R(\sigma_{\perp})$ , uwzględnia tu zależność na prędkość rozwoju szczeliny zmęczeniowej lub też odporność na zniszczenie  $\sigma_d$  elementu.

W pracy [120] podano też wzory na uwzględnianie naprężeń własnych  $\sigma_w$  na wytrzymałość elementów poprzez współczynnik intensywności naprężeń  $K$ . Dla tarczy o szerokości  $2b$  ze szczeliną krawędziową długości  $2a$ , znajdującą się w polu naprężeń własnych  $\sigma_w$

$$K = K_o + K_w = \sigma_o \sqrt{2b \operatorname{tg} \frac{a}{2b}} + \int_{-a}^a \frac{\sigma_w}{\chi_a} \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx, \quad (107)$$

gdzie:

$K_o$  - współczynnik intensywności naprężeń od obciążenia zewnętrznego  $\sigma_o$ ,

$K_w$  - współczynnik intensywności naprężeń własnych.

Dla odpowiedniej wartości współczynnika  $K$  może nawet nastąpić zatrzymanie wzrostu szczeliny. Do analizy prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych stosuje się te prawa wzrostu pęknięć, które uwzględniają zmianę naprężenia średniego, spowodowaną istnieniem naprężeń własnych. Może to być prawo Formana

$$\frac{da}{dN} = \frac{D(\Delta K)^m}{(1-R) K_c - \Delta K} \quad (108)$$

lub prawo Wnuka-Czeriepanowa

$$\frac{da}{dN} = -\beta \left( \frac{K_{\max}^2 - K_{\min}^2}{K_c^2} + \ln \frac{K_c^2 - K_{\max}^2}{K_c^2 - K_{\min}^2} \right), \quad (109)$$

gdzie:

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{K_o \min + K_w}{K_o \max + K_w} \quad (110)$$

$K_o \min$  - minimalna wartość współczynnika intensywności naprężeń odpowiadająca minimalnej wartości naprężenia zmiennego,

- $K_{o \max}$  - maksymalna wartość współczynnika intensywności naprężeń odpowiadająca maksymalnej wartości naprężenia zmiennego,  
 $K_c$  - granica wytrzymałości zmęczeniowej materiału.

$$K_{\min} = \int_{-a}^a \frac{(\sigma_{o \max} + \sigma_w)}{\sqrt{\lambda a}} \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (111)$$

i

$$K_{\max} = \int_{-a}^a \frac{(\sigma_{o \max} + \sigma_w)}{\sqrt{\lambda a}} \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx. \quad (112)$$

Podana zależność (107) może być zastosowana do obliczenia trwałości i niezawodności elementów według związków (105) i (106).

Inne ujęcie opisu wpływu naprężeń własnych na rozwój szczeliny zmęczeniowej podano też w opracowaniu [67]. Jeżeli do opisu podkrytycznego ruchu szczeliny zmęczeniowej przyjmuje się zmodyfikowane równanie Parisa

$$\frac{da}{dN} = D_1 (1 + \alpha R)^q (\Delta K)^q, \quad (113)$$

gdzie:

$a$  - długość szczeliny,

$N$  - liczba cykli,

$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  - współczynnik amplitudy cyklu,

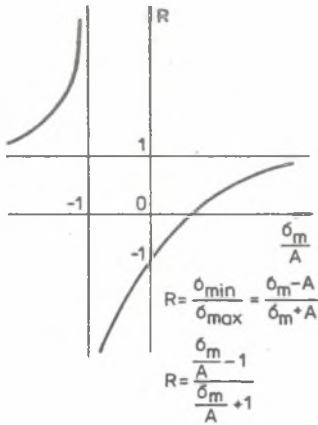
$\Delta K$  - zakres zmienności współczynnika intensywności naprężeń,

$D_1, \alpha, q$  - stałe materiałowe,

lub zależność (108), to wpływ naprężeń własnych na przebieg badanego zjawiska jest możliwy do uwzględnienia przez zależność współczynnika amplitudy cyklu  $R$  od naprężenie średniego  $\sigma_m$ . Obliczeniowe naprężenia średnie  $\sigma_m$  jest modyfikowane przez naprężenie własne i średnie rzeczywiste naprężenie cyklu wyniesie

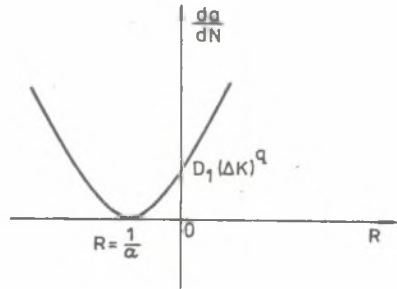
$$\sigma_m \text{ rzec.} = \sigma_m + \sigma_w.$$

Na rys. 9, 10, 11, korzystając z funkcji (108) i (113), przedstawiono graficznie zależności między współczynnikiem amplitudy cyklu  $R$  a naprężeniem średnim oraz zależności prędkości propagacji szczeliny w ruchu podkrytycznym od wartości współczynnika amplitudy cyklu  $R$ , uwzględniając proste związki pomiędzy  $R$ ,  $\sigma_m$  i  $A$  (amplituda cyklu).



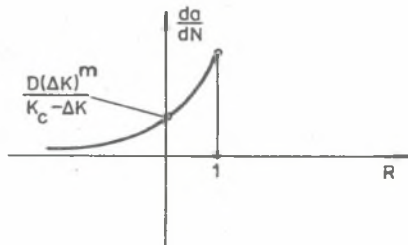
Rys. 9. Graficzne przedstawienie zależności współczynnika amplitudy cyklu R od naprężenia średniego  $\sigma_m$  [67]

Fig. 9. Graphical presentation of dependence of cycle amplitude factor R on mean stress  $\sigma_m$  [67]



Rys. 10. Wpływ współczynnika amplitudy cyklu R na prędkość ruchu szczeliny opisaną równaniem (113) [67]

Fig. 10. Effect of cycle amplitude factor R on fissure motion speed described by equation (113) [67]



Rys. 11. Wpływ współczynnika amplitudy cyklu R na prędkość ruchu szczeliny opisaną równaniem (108) [67]

Fig. 11. Effect of cycle amplitude factor R on fissure motion speed described by equation (108) [67]

Podane zależności można również przedstawić w postaci funkcji

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma_m) \quad (114)$$

W tym przypadku równanie (113) przybiera formę

$$\frac{da}{dN} = D_2 \left( 1 + \alpha \frac{\sigma_m - A}{\sigma_m + A} \right)^q, \quad (115)$$

gdzie:

$$D_2 = D_1 (2A \sqrt{\pi a})^q,$$

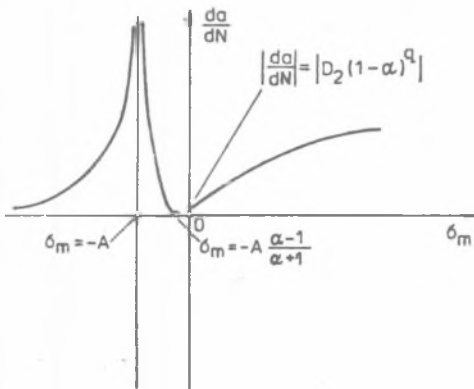
a równanie (108) przekształci się do postaci

$$\frac{da}{dN} = \frac{D (\sigma_m + A)}{K_c - \sqrt{\pi a} (\sigma_m + A)} \quad (116)$$

gdzie:

$$D = \frac{D_0 (2A \sqrt{\pi a})^m}{2A}$$

Graficzne przedstawienie tych zależności podano na rys. 12 i 13.



Rys. 12. Prędkość rozprzestrzeniania się szczeliny w funkcji  $\sigma_m$  według zależności (115) [67]

Fig. 12. Fissure spreading speed versus  $\sigma_m$  according to dependance (115) [67]

Jeżeli uwzględnić dodatkową hipotezę Elbera [120] o istnieniu progowej wartości naprężenia  $\sigma_0$ , powyżej której jest dopiero możliwa propagacja szczeliny, to efektywny zakres zmienności współczynnika intensywności  $\Delta K$  we wzorze (113) należy skorygować w myśli zależności

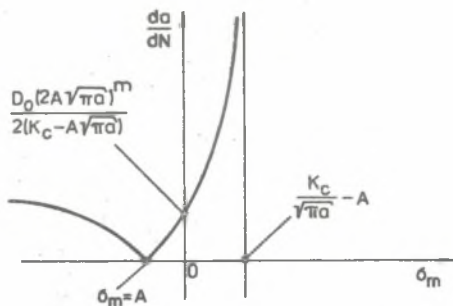
$$K_{ef} = (\sigma_{max} - \sigma_0) \sqrt{\pi a}, \quad (117)$$

$$K_{ef} = f(R) \Delta K; \quad \sigma_0 > \sigma_{min}. \quad (118)$$

Warto również podkreślić, że w polu naprężeń ściskających materiał jest zdolny do przeno-

szenia znacznie większych odkształceń plastycznych bez objawów dekohezji. Zjawisko to zwiększa człon jednostkowej pracy odkształceń plastycznych  $\gamma_p$  w modyfikowanym równaniu Griffitha na naprężenie krytyczne  $\sigma_0$  potrzebne do rozprzestrzeniania się szczeliny, a więc utrudnia dodatkowo rozwój procesu zmęczenia

$$\sigma_0 = \left[ \frac{2E (\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (119)$$



Rys. 13. Prędkość rozprzestrzeniania się szczeliny w funkcji  $\sigma_m$  według zależności (116) [67]

Fig. 13. Fissure spreading speed versus  $\sigma_m$  according to dependance (116) [67]

gdzie:

$E$  - moduł Younga,

$\gamma_s$  - jednostkowa energia powierzchniowa.

Inne zależności wpływu  $R$  i  $\sigma_m$  na prędkość pęknięcia materiału przedstawiono w pracy [57]. I tak N.E. Frost podał następującą postać wzoru

$$\frac{da}{dN} = A^Q (P + Q \sigma_m), \quad (120)$$

gdzie:

$P$  i  $Q$  - stałe materiałowe, przy czym  $Q$  jest

bliskie lub równe zero dla niskowęglowych stali, aluminium, miedzi i tytanu,  $q$  dla większości metali wynosi 3.

Badania autora wykazały istotny wpływ współczynnika  $R$  na prędkość pęknięcia w stali o podwyższonej wytrzymałości 20G2ANbY przy rozciąganiu i rozciąganiu-ściskaniu. Natomiast dla stali 15G2ANb wpływ ten był bardzo mały. Dużą zależność prędkości pęknięcia od  $\sigma_m(R)$  wykazały stopy aluminium z cynkiem i miedzią. Na zmianę prędkości pęknięcia oddziałuje tu wydzielanie faz wtórnych. Podobna zależność wystąpiła w stali po zgnioście na zimno i w stali niskowęglowej, ale o określonej wielkości ziarna. Natomiast D. Broek i J. Schijveg przedstawili zależność

$$\frac{da}{dN} = C_1 e^{-C_2 R} (\sigma \sqrt{a})^3 \left[ 1 + 10 \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right], \quad (121)$$

gdzie:

$C_1$  i  $C_2$  - stałe,

$2b$  - szerokość płyty ze środkowym pęknięciem o długości  $2a$ .

Z kolei R. Roberts i F. Erdogan opracowali wzory uwzględniające wpływ  $\sigma_m$  na prędkość pęknięcia

$$\frac{da}{dN} = B (1 + \beta)^2 (\Delta K')^4 \quad (122)$$

$$i \quad \frac{da}{dN} = B (K_{max})^2 (\Delta K')^2, \quad (123)$$

gdzie:

$$\beta = K_m / K', \quad K_m = 1/2 (K_{\max} + K_{\min}),$$

$$\Delta K' = 1/2 (K_{\max} - K_{\min}),$$

B - stała materiałowa.

Podane wzory wyprowadzono opierając się na długości strefy plastycznej przed czołem pęknięcia.

B. Tomkins podał wzór dla zakresu małych naprężeń ( $2\Delta\sigma \cdot \sigma_m \leq R_e^2$ ) bez ograniczeń co do rodzaju materiału

$$\frac{da}{dN} = A_2 \Delta\sigma \frac{1 + \beta}{\beta^2} \sigma_m a, \quad (124)$$

przy czym  $\beta$  jest wykładnikiem w równaniu  $\Delta\sigma = k \Delta\epsilon_D^\beta$ .

I. Parson wykazał, że wpływ  $\sigma_m$  na prędkość pęknięcia w stopach aluminium jest tym większy, im niższa jest odporność na pęknięcie  $K_c$ . Wyniki badań ujął zmodyfikowanym wzorem (108)

$$\frac{da}{dN} = \frac{c(\Delta K)^m}{[(1 - R) K_c - \Delta K]^{1/2}} \quad (125)$$

B. Mukherjee i D.J. Burns omówili równanie najlepiej porównywalne z zależnością (108), ale w którym nie występuje  $K_c$ :

$$\frac{da}{dN} = \theta_0 (\Delta K)^{\theta_1} (K_{\max})^{\theta_2} \quad (126)$$

M. Klesnil podał zależność na prędkość pęknięcia w stalach o zawartościach 0,04, 0,12 i 0,65% C

$$\frac{d(2a)}{dN} = A [(K_a p^\delta)^\beta - (K_a p^\delta)_{th}^\beta], \quad (127)$$

gdzie:

- A i  $\beta$  są stałymi materiałowymi zależnymi od wytrzymałości,
- $\delta$  - wykładnik niezależny od wytrzymałości,
- $P = K_{\max} K_a = \sigma_{\max} \sigma_a$ ; indeks th wskazuje na wartości progowe,
- $K_a$  - współczynnik amplitudy intensywności naprężeń.



Uwzględnienie COD w opisie prędkości pęknięcia przy różnych współczynnikach R odprowadziło do wzoru

$$\frac{da}{dN} = \frac{16A}{\pi R^2 E} \left[ K_a - K_{ath} \left( \frac{1-R}{1+R} \right)^{1/2} \right] \frac{1-R}{1+R} \quad (128)$$

gdzie:

$K_{ath}$  odnosi się do wartości progowej.

Przycoczony w [57] bogaty materiał aktualnego stanu badań doświadczalnych wskazuje na odmienne zachowanie się różnych materiałów w warunkach działania  $\sigma_m$ . Przyczyn takiego zachowania należałoby szukać w budowie materiałów. Rozwój pęknięcia jest równomierniejszy w metalach czystych i plastycznych w przeciwieństwie do stopów wielofazowych, gdzie o tym rozwoju współdecydują wtrącenia i wydzielenia faz. Proces pęknięcia w tych ostatnich przebiega skokowo. Prędkość pęknięcia jest jakby wypadkową prędkości w osnowie i w wydzielinach, w których pojawiają się pęknięcia jeszcze przed ozołem pęknięcia głównego. A przecież wysokie naprężenie średnie sprzyja właśnie takiemu pękaniu.

Badania teoretyczne i doświadczalne z zakresu mechaniki pęknięcia są przedmiotem bardzo dużej liczby prac, zwłaszcza w ostatnim czasie. Powstało wiele ośrodków badawczych zajmujących się tą problematyką. Ukazały się już opracowania syntetyczne. W tej pracy natomiast ograniczono się do przedstawienia wybranych zależności, które w dostatecznym stopniu wykazują wpływ WW na prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych, dając tym samym pełniejszy pogląd o stopniu wpływu cech materiału na trwałość i niezawodność elementów maszyn.

Szczelina zmęczeniowa jest najczęściej inicjowana na obszarze WW. Stąd też wydaje się, iż wielkości odgrywające istotną rolę w tym procesie powinny być uwzględniane też w charakterystyce stref WW [32]. Wybór tych wielkości niewątpliwie będzie uzależniony od rozwoju wiedzy w tej dziedzinie, a przede wszystkim od wypracowania odpowiednich metod badawczych. Od tego też będzie uzależniony zakres wykorzystania wiedzy z zakresu mechaniki pęknięcia w obliczeniach trwałości i niezawodności elementów maszyn.

Wszystkie opisane modele wskazują na duże możliwości kształtowania trwałości i niezawodności poprzez właściwe ustalenie wytrzymałości zmęczeniowej Z w procesach obróbki powierzchniowej, między innymi za pomocą przedstawionych w pracy modeli wiążących parametry procesu technologicznego ze stanem i właściwościami WW.

Należy mieć na uwadze i to, że do prognozowania trwałości i niezawodności elementów mogą być brane również pod uwagę i inne parametry WW (np. łatwe do identyfikacji) po warunkiem, że ich wpływ na kształtowanie niezawodności jest znany.

Niezmiernie ważnym problemem jest wybór modelu matematycznego do wyznaczenia trwałości i niezawodności elementów. Wybór taki powinien być uzależniony od klasy elementów, warunków ich pracy i wymaganej dokładności określenia samej niezawodności.

## 6. EKSPERYMENTALNE BADANIA WŁASNE

Przedstawione badania własne autora związane są z tymi zagadnieniami, którym poświęca się bardzo mało miejsca w literaturze krajowej, a które decydująco wpływają na kształtowanie trwałości i niezawodności elementów metodami technologicznymi. Przede wszystkim należy tu zaliczyć wpływ warunków obróbki powierzchniowej na ważną własność WW, jaką jest zużycie korozyjne. Innym niezmiernie istotnym problemem jest pokazanie związków ilościowych pomiędzy właściwościami WW oraz trwałością i niezawodnością elementów maszyn.

Starano się dobrać najbardziej adekwatny rodzaj badań do klasy elementów maszyn będących przedmiotem niniejszej pracy. Wybrano w tym celu takie sposoby obróbki powierzchniowej, jak szlifowanie, obróbkę strumieniowo-ścierną i kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi. Z kolei zastosowano opracowane w pracy modele do ilościowego określenia wpływu warunków tych sposobów obróbki na najbardziej istotne parametry WW.

Inny zakres badań jest poświęcony wpływowi przedstawionych sposobów obróbki na zużycie korozyjne typu wżerowego (punktowego) i na korozję naprężeniową. Właśnie na takie rodzaje korozji najczęściej uarażone są ekspozowane w pracy elementy maszyn.

Na podstawie wcześniejszych badań wytrzymałościowych [15] wykazano, w jaki sposób kształtuje się trwałość i niezawodność elementów po różnych sposobach obróbki powierzchniowej. Wymieniony zakres badań w dostatecznym stopniu potwierdza zarówno słuszność przyjęcia stosowanej metodyki w pracy, jak i celowość opracowania samego tematu.

### 6.1. Wpływ procesów szlifowania i kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi na wybrane parametry stanu warstwy wierzchniej

W badaniach eksperymentalnych postanowiono zrealizować etap 3 identyfikacji procesu fizycznego (podrozdział 4.1), tj. opracowane modele w postaci zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych poddać kontroli doświadczalnej. Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie płytek o wymiarach 100x18, x3,1 mm, wykonanych z materiału EJ736 o składzie chemicznym przedstawionym w tab. 2.

Tabela 2

Skład chemiczny stali EJ736 według normy  
CMTU-1-55-67 (ZSRR)

Cr	C	Si	Mn	Ni	W	V	S	P	Ti	Bo
13-	0,10-	0,6%	0,6%	2,8-	1,6	0,18-	0,02%	0,05%	0,05%	0,04%
15%	0,16%	-	-	3,4%	2,2%	0,28%	-	-	-	-

Do wykonania próbek użyto materiału z jednego wsadu i jednego wytopu celem uzyskania małych rozrzutów właściwości materiałowych poszczególnych próbek. Tego typu stale, należące do klasy chromowych martenzytycznych stali nierdzewnych ulepszanych dodatkami innych pierwiastków, są skłonne do korozji wżerowej. Uważa się, że przyczyną tej korozji jest niejednorodność struktury materiału (różne fazy, wtrącenia niemetaliczne). Obróbką wstępną próbek było cięcie i następnie frezowanie. Tak przygotowane próbki poddano obróbce cieplnej:

- hartowaniu z temperatury  $1343 \pm 10$  K,
- odpuszczaniu w temperaturze  $843 \pm 10$  K z chłodzeniem w powietrzu.

Za wielkości sterowalne podczas szlifowania przyjęto: posuw poprzeczny  $p_p$ , posuw wzdłużny  $p_t$  i głębokość szlifowania  $g$ , przy czym  $p_p = 0,5 - 1,5$  mm/podw.skok,  $p_t = 12 - 20$  m/min,  $g = 0,01 - 0,05$  mm. Pozostałe wielkości wejściowe przyjęto jako stałe. Próbki szlifowano na szlifierce do płaszczyzn SPC-20a. Stosowano ściernice T1A175 x 20 x 51/99A60KSV. W celu wyeliminowania wpływu zużycia ściernicy na stan WW próbek proces jej obciążania realizowano każdorazowo po obróbce jednoczesnej pięciu próbek. Dla każdej obrabianej partii próbek stosowano dwa przejścia robocze bez wyiskrzania. Proces szlifowania przeprowadzono na sucho. Szlifowano powierzchnie jednej strony próbek. Warunki szlifowania optymalizowano we wcześniejszych badaniach, głównie pod kątem wprowadzenia do WW dużych naprężeń własnych, ale bez obecności przypaleń. Do identyfikacji rezultatów badań przyjęto statyczny kompletny program dwuwartościowy PS-DK( $2^k + 0$ ). Program w zakresie małej liczby czynników badanych  $k$  (w naszym przypadku  $k=3$ ), cechuje się dużą prostotą i dużą informatywnością. [89]. Jako parametry WW po szlifowaniu wyznaczono naprężenia własne  $\sigma_w$  i chropowatość powierzchni  $R_a$ . Do wyznaczenia naprężeń własnych zastosowano skróconą metodę, opisaną w [28]. Wartość ich określano ze wzoru:

$$\sigma_w = \frac{10^2 E (4g_p f + \xi l^2)^3}{48g_p l^2 f(4g_p f - \xi l^2)} \text{ MPa,} \quad (129)$$

gdzie:

- E - moduł Younga, Pa,
- $\epsilon_p$  - grubość próbki, m,
- f - wartość strzałki ugięcia próbki, m,
- l - długość pomiarowa próbki, m,
- $\epsilon$  - wydłużenie względne próbki.

Ze względu na małe wartości  $\epsilon$  zależność (129) sprowadziła się do postaci

$$\sigma_w = \frac{10^2 E \epsilon_p f}{3 l^2} \text{ MPa,} \quad (130)$$

przy czym  $l = 0,089$  m. Pomiaru strzałki ugięcia próbki dokonywano przed jej obróbką i po obróbce na powierzchni nie poddanej obróbce.

Stałe parametry procesu szlifowania wynosiły:  $v = 25,4$  m/s,  $E = 18,75 \cdot 10^4$  MPa,  $U = 68,65 \cdot 10^4$  kg/s<sup>2</sup>,  $H_M = 360$  HB  $\approx 3600$  MPa,  $R_e = 883$  MPa,  $R_m = 1130$  MPa,  $z_s = 180$  s.

W warunkach prowadzonego eksperymentu, tj. po uwzględnieniu wielkości sterowalnych i stałych, zależność (17) aproksymowana jednomianem potęgowym przyjmie postać

$$\frac{R_a E}{U} = a_0 \left(\frac{p E}{U}\right)^{a_1} \left(\frac{p_t E z_s}{U}\right)^{a_2} \left(\frac{\epsilon E}{U}\right)^{a_3}, \quad (131)$$

a zależność (18):

$$\frac{\sigma_w}{E} = a_0 \left(\frac{p E}{U}\right)^{a_1} \left(\frac{p_t E z_s}{U}\right)^{a_2} \left(\frac{\epsilon E}{U}\right)^{a_3}. \quad (132)$$

Natomiast przy aproksymowaniu wielomianem liniowym

$$\frac{\sigma_w}{E}, \frac{R_a E}{U} = b_0 + b_1 \left(\frac{p E}{U}\right) + b_2 \left(\frac{p_t E z_s}{U}\right) + b_3 \left(\frac{\epsilon E}{U}\right). \quad (133)$$

Przyjmując

$$X_1 = \frac{p E}{U}; \quad X_2 = \frac{p_t E z_s}{U}; \quad X_3 = \frac{\epsilon E}{U},$$

$$Y = \frac{R_a E}{U} \quad \text{lub} \quad Y = \frac{\sigma_w}{E},$$

otrzymuje się

$$Y = a_0 X_1^{a_1} X_2^{a_2} X_3^{a_3} \quad (134)$$

i

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3. \quad (135)$$

Obliczenie współczynników  $a_0, a_1, a_2, a_3$  z równania regresji liniowej przeprowadzono po transformacji równania (134) do postaci równoważnej z równaniem (135) i wtedy

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3, \quad (136)$$

gdzie:  $y = \lg Y,$

$$b_0 = \lg a_0,$$

$$b_1 = a_1,$$

$$b_2 = a_2,$$

$$b_3 = a_3,$$

$$X_1 = \lg\left(\frac{P \cdot E}{U}\right),$$

$$X_2 = \lg\left(\frac{P \cdot E \cdot z_s}{U}\right),$$

$$X_3 = \lg\left(\frac{E \cdot E}{U}\right).$$

Obliczenia współczynników regresji dokonano metodą analizy regresji na podstawie zasady najmniejszej sumy kwadratów błędów pomiarów. Otrzymane w ten sposób równania regresji poddano statystycznej ocenie, tj.:

- ocenie dokładności pomiarów,
- sprawdzeniu istotności współczynników regresji,
- sprawdzeniu adekwatności przyjętego MMOB<sup>x)</sup>.

Pomijając szczegółowy tok obliczeń współczynników regresji oceny statystycznej równania regresji i adekwatności przyjętych modeli matematycznych, ponieważ zagadnienie to jest eksponowane w dostępnej literaturze, otrzymano dla chropowatości powierzchni następujące równania:

- równanie w postaci bezwymiarowej

<sup>x)</sup> Matematyczny model obiektu badań.

$$\frac{R_a E}{U} = 76060 \cdot 10^{-6} + 35,46 \cdot 10^{-10} \left( \frac{P_t E z_s}{U} \right) + 3207 \cdot 10^{-6} \left( \frac{g E}{U} \right), \quad (137)$$

- równanie w postaci wymiarowej

$$R_a = 2,78 \cdot 10^{-1} + 6,39 \cdot 10^{-1} P_t + 3,21 \cdot 10^3 g \mu m. \quad (138)$$

W przypadku naprężeń własnych WW równania regresji są następujące:

- równanie w postaci bezwymiarowej

$$\frac{\sigma_w}{E} = 194 \cdot 10^{-6} \left( \frac{g E}{U} \right) - 400 \cdot 10^{-6}, \quad (139)$$

- równanie w postaci wymiarowej

$$\sigma_w = 9,94 \cdot 10^6 g - 75 \text{ MPa}. \quad (140)$$

W przypadku modelu potęgowego równania regresji przyjmują następujące postacie:

- równania w postaci bezwymiarowej i wymiarowej dla chropowatości powierzchni

$$\frac{R_a E}{U} = 20,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{P_t E z_s}{U} \right)^{0,24} \left( \frac{g E}{U} \right)^{0,16}, \quad (141)$$

$$R_a = 4,12 P_t^{0,24} g^{0,16} \mu m, \quad (142)$$

- równania w postaci bezywymiarowej i wymiarowej dla naprężeń własnych WW

$$\frac{\sigma_w}{E} = 12 \cdot 10^{-6} \left( \frac{g E}{U} \right)^{1,98}, \quad (143)$$

$$\sigma_w = 13,07 \cdot 10^{10} g^{1,98} \text{ MPa}. \quad (144)$$

Dla kulkowania strumieniowego jako wielkości sterowalnych przyjęto:

- czas obróbki  $t_m = 30-40 \text{ s}$ ,
- ciśnienie strumienia roboczego  $p_R = 0,35 - 0,45 \text{ MPa}$ ,
- długość strumienia roboczego  $l_x = 0,1 - 0,12 \text{ m}$ .

Pozostałe wartości stałych parametrów wynosiły:  $C_k = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ ,  $d_k = 0,0001 \text{ m}$ ,  $\alpha_n = \pi/2 \text{ rad}$ ,  $f_u = 3600 \text{ s}$ ,  $f_o = 376,74 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ . Parametr  $f_o$ , przyjęty jako ilość wydzielającego się ciepła w czasie obróbki, można obliczyć ze wzoru Newtona

$$Q = \alpha F(t_2 - t_1) \tau \quad J = 551 \text{ J}, \quad (145)$$

gdzie:  $\alpha = 8,7 \text{ J/m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{K}$

$F = 0,001 \text{ m}^2$  - powierzchnia próbki,

$t_2 = 873 \text{ K}$ ,

$t_1 = 293 \text{ K}$ .

Wartości parametrów materiałowych próbek podano omawiając proces szlifowania.

Do budowy modeli matematycznych zastosowano również metodykę jak podczas szlifowania i otrzymano następujące zależności:

- dla parametru chropowatości  $R_a$

$$R_a \sqrt{\frac{E}{F_u}} = -4,123 \cdot 10^{-4} + 0,0139 \frac{t_m}{u} + 3,460 \frac{P_R}{H_M}, \quad (146)$$

- dla naprężeń własnych  $\sigma_w$

$$\frac{\sigma_w}{E} = 19,1 \frac{P_R}{H_M} - 0,73 \cdot 10^{-4}, \quad (147)$$

a po uwzględnieniu małej wartości drugiego składnika

$$\frac{\sigma_w}{E} = 19,1 \frac{P_R}{H_M}. \quad (148)$$

Przedstawione modele matematyczne charakteryzują się niewątpliwie prostymi postaciami i poprzez zawieranie w sobie większej liczby parametrów technologicznych mogą być bardziej adekwatne do warunków rzeczywistych, w jakich prowadzony jest proces technologiczny.

#### 6.2. Modelowanie wpływu parametrów kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi na naprężenia własne warstwy wierzchniej materiału EJ736 metodą wyboru bazy wymiarowej

Identyfikację procesu wymiarowego można realizować w zasadzie dwoma sposobami [11,58]:

1. Ustala się bazę wymiarową  $D = (x_1, x_2 \dots x_m)$  i zmienia się postać funkcji  $F(x_1, x_2 \dots x_s)$  aż do uzyskania wystarczającej dokładności aproksymacji, tzn. do otrzymania dostatecznie małej wartości kryterium jakości identyfikacji



$$d_t = \sum_{i=1}^K (\bar{y}_i - y_i)^2, \quad (149)$$

tj. sumy kwadratów błędów,

gdzie:

$\bar{y}_i$  - wartość zmierzona wielkości wyjściowej  $y_i$  ( $i=1, 2, \dots, K$ ),

$y_i$  - wartość wielkości  $y$  obliczona z założonej postaci funkcji  $f$ ,

$K$  - liczba przeprowadzonych pomiarów.

Postać operatora funkcyjnego  $F$  poszukuje się w praktyce z reguły wśród wielomianów, zaczynając od wielomianu stopnia pierwszego.

2. Ustala się z góry postać funkcji aproksymującej  $F(x_1, x_2 \dots x_s)$ , a zmienia się bazę wymiarową

$$D_t = x_{1t}, x_{2t} \dots x_{mt}, \quad (150)$$

przy czym liczba możliwych wyborów bazy wymiarowej musi spełnić warunek

$$T \leq \frac{n!}{m!(n-m)!}, \quad (151)$$

gdzie:

$n$  - liczba wielkości wejściowych procesu,

$m$  - liczba wielkości tworzących bazę wymiarową.

Nierówność (151) uzasadnia się tym, że niektóre spośród  $T$  kombinacji mogą nie tworzyć bazy wymiarowej, ponieważ nie spełniają warunku niezależności wymiarowej. Dla założonej postaci funkcji aproksymującej  $F(x_1, x_2 \dots x_s, C_0, C_1 \dots C_s)$  i wybranej bazy wymiarowej  $D_t$  oblicza się optymalne wartości współczynników  $C_j$  ( $j = 0, 1, 2 \dots s$ ) z warunku

$$d = \min \rightarrow \frac{\partial d}{\partial C_k} = 0; \quad (k = 0, 1, 2 \dots n) \quad (152)$$

oraz z równania (149) wartość przyjętego kryterium jakości identyfikacji  $d_t$ . Czynności te powtarza się dla wszystkich możliwych kombinacji baz wymiarowych, przy czym postać operatora funkcyjnego  $F$  pozostaje zawsze taka sama.

Bazę wymiarową  $d_{opt}$ , dla której kryterium jakości identyfikacji przyjmuje wartość najmniejszą (minimum bezwzględne), tj.

$$d_{opt} = \min (d_1, d_2 \dots d_r), \quad (153)$$

nazywa się optymalną bazą wymiarową.

Niech  $d_w$  oznacza wymaganą wartość kryterium dokładności aproksymacji. Jeżeli  $d_{opt} < d_w$ , to na tym należy zakończyć identyfikację rozpatrywanego procesu. Jeżeli natomiast  $d_{opt} > d_w$ , wówczas należy założyć inną postać operatora funkcyjnego  $F$  i powtórzyć wszystkie opisane czynności.

W badaniach własnych poszukiwano modelu matematycznego procesu opisującego wpływ wybranych parametrów technologicznych kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi na naprężenia własne  $\sigma_w$  WW materiału EJ736. Zbiór wybranych parametrów technologicznych procesu kulkowania przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3  
Wybrane parametry technologiczne procesu kulkowania

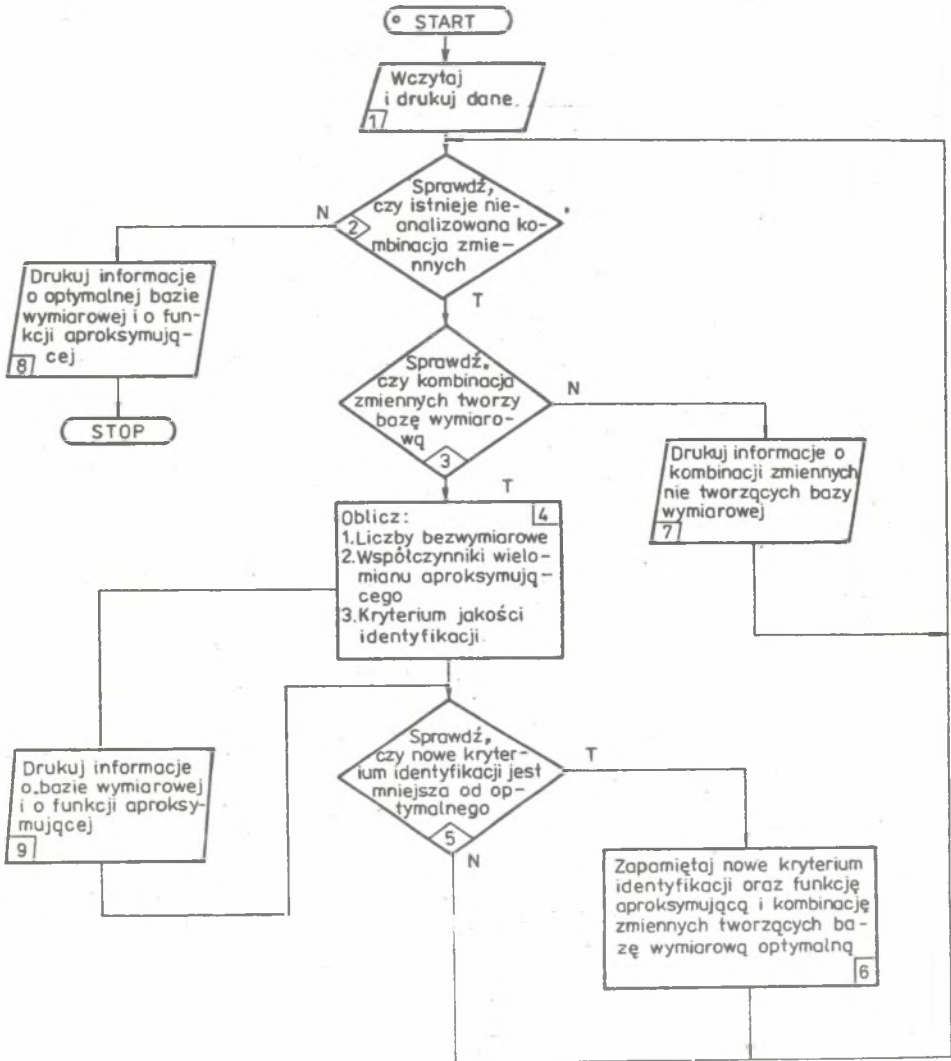
Lp.	Nazwa parametru	Znak w programie	Oznaczenie	Wymiar w jednostkach SI	Wymiar w jednostkach ogólnych		
					M	K	S
1.	Ciśnienie strumienia roboczego	$X_1$	$p_R$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
2.	Średnica kulek	$X_2$	$d_k$	m	1	0	0
3.	Czas obróbki	$X_3$	$t_m$	s	0	0	1
4.	Długość strumienia roboczego	$X_4$	$l_r$	m	1	0	0
5.	Twardość materiału obrabianego	$X_5$	$H_M$	$kg/m \cdot s^2$	-1	1	-2
6.	Czas pracy	$X_6$	$f_u$	s	0	0	1

Naprężenia własne w WW badano na próbkach wykonanych z materiału EJ736 metodą trawienia bezprądowego. Wymiary próbek, sposób ich obróbki oraz właściwości materiału EJ736 podano w podrozdziale 6.1. Badania przeprowadzono według programu dwuwartościowego PS-DK ( $2^K + 0$ ) i otrzymano następujące wyniki (tab. 4).

Tabela 4  
Wartości parametrów pomiarów technologicznych

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	Y
$p_R$	$d_k$	$t_m$	$l_r$	$H_M$	$f_u$	$\sigma_w$
$0,45 \cdot 10^6$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^2$	0,12	$3,6 \cdot 10^9$	$0,360 \cdot 10^4$	$0,492 \cdot 10^9$
$0,45 \cdot 10^6$	wartość	$0,3 \cdot 10^2$	0,12	wartość	wartość	$0,471 \cdot 10^9$
$0,35 \cdot 10^6$	stała	$0,4 \cdot 10^2$	0,12	stała	stała	$0,392 \cdot 10^9$
$0,35 \cdot 10^6$		$0,3 \cdot 10^2$	0,12			$0,374 \cdot 10^9$
$0,45 \cdot 10^6$		$0,4 \cdot 10^2$	0,1			$0,451 \cdot 10^9$
$0,45 \cdot 10^6$		$0,3 \cdot 10^2$	0,1			$0,415 \cdot 10^9$
$0,35 \cdot 10^6$		$0,4 \cdot 10^2$	0,1			$0,348 \cdot 10^9$
$0,35 \cdot 10^6$		$0,3 \cdot 10^2$	0,1			$0,315 \cdot 10^9$

Następnie zbudowano algorytm identyfikacji procesu wymiarowego z założeniem liniowej funkcji aproksymującej według schematu przedstawionego na rys. 14. Na podstawie przedstawionego algorytmu opracowano program w języku FORTRAN na maszynę cyfrową RIAD 32. Zgodnie z zależnością (153) otrzymano sześć kombinacji bazy wymiarowej. Odpowiednie postacie funkcji



Rys. 14. Algorytm identyfikacji procesu kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi

Fig. 14. Algorithm of identification of glass bead peening process

Tabela 5

## Zestawienie postaci funkcji aproksymujących

Lp.	Postać funkcji	baza wymiarowa	Kryterium identyfikacji
1.	$\frac{\sigma_w}{H_M} = -0,0012 + 1105,98 \frac{P_R}{H_M} - 8,65 \frac{d_k}{I_x} + 0,000009 \frac{f_m^2}{t_m}$	$t_m, I_x, H_M$	0,00046
2.	$\frac{\sigma_w}{H_M} = -0,0010 + 1060,94 \frac{P_R}{H_M} + 0,00001 \frac{I_x}{d_k} - 0,00017 \frac{f_m^2}{t_m}$	$d_k, t_m, H_M$	0,00033
3.	$\frac{\sigma_w}{P_R} = -8,26 + 0,90 \frac{I_x}{d_k} + 0,014 \frac{H_M}{P_R} - 0,63 \frac{f_u}{t_m}$	$P_R, d_k, t_m$	25601,59
4.	$\frac{\sigma_w}{P_R} = -27,05 + 978626 \frac{d_k}{I_x} + 0,024 \frac{H_M}{P_R} - 0,94 \frac{f_u}{t_m}$	$P_R, t_m, I_x$	159021
5.	$\frac{\sigma_w}{P_R} = -1,02 + 68020,42 \frac{t_m}{I_x} + 0,30 \frac{I_x}{d_k} + 0,0041 \frac{H_M}{P_R}$	$P_R, d_k, f_u$	55579,63
6.	$\frac{\sigma_w}{P_R} = -15,92 + 824758 \frac{d_k}{I_x} + 35741,87 \frac{t_m}{I_x} - 0,0095 \frac{H_M}{P_R}$	$P_R, I_x, f_u$	114393
7.	$\frac{\sigma_w}{H_M} = -0,0013 + 958,47 \frac{P_R}{H_M} + 11,20 \frac{d_k}{I_x} + 0,19 \frac{t_m}{I_x}$	$I_x, H_M, f_u$	0,00033
8.	$\frac{\sigma_w}{H_M} = -0,0017 + 924,13 \frac{P_R}{H_M} + 1,04 \frac{t_m}{I_x} + 0,000002 \frac{I_x}{d_k}$	$d_k, H_M, f_u$	0,00042
9.	$\sigma_w = -6,12 + 924,13 P_R + 1,04 t_m + 72 I_x$ [MPa]		

aproksymujących zestawiono w tab. 5. Najmiejze kryterium jakości identyfikacji otrzymano dla baz, którą tworzą parametry  $(d_k, t_m, H_M)$  i  $(l_r, H_M, f_u)$  zaś najwygodniejszą postać modelu ze względu na rozdzielenie parametrów sterowalnych otrzymano dla bazy  $(d_k, f_u, H_M)$ .

W pracy [11] podano też sposób identyfikacji procesu wymiarowego z wyborem tzw. adekwatnej bazy wymiarowej, którą nazwano taki zbiór  $m$  wymiarowo niezależnych zmiennych  $(x_1, x_2 \dots x_m, x_1, x_2 \dots x_s)$  ( $m < n, s = n - m$ ). Zbiór ten spełnia jednocześnie następujące warunki:

a) wszystkie zmienne  $x_i$  ( $i = 1, 2 \dots m$ ) wchodzące w skład bazy są niesterowalne,

b) kryterium jakości identyfikacji (149) przyjmuje wartość najmniejszą  $d_{ad}$  ze wszystkich możliwych wartości  $d_t$ , odpowiadających wszystkim kombinacjom bez wymiarowych  $D_t$ , które spełniają warunek a.

Liczba możliwych kombinacji wyborów bazy wymiarowej wyniesie

$$T \leq \frac{(n - p)!}{m! n - p - m!}, \quad (154)$$

gdzie:

$p$  - liczba sterowalnych wielkości wejściowych.

Stosując metodę wyboru bazy wymiarowej można znacznie zwiększyć dokładność otrzymanego modelu matematycznego.

### 6.3. Modelowanie wpływu kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi na stan warstwy wierzchniej w warunkach zmieniającej się w czasie charakterystyki procesu

Dla niektórych metod lub sposobów obróbki powierzchniowej model matematyczny, ujmujący zależność wpływu parametrów obróbki np. na stan WW, może zmieniać się w zależności od czasu trwania procesu. Przykładem takiego sposobu obróbki może być kulkowanie strumieniowe, gdzie o intensywności procesu w dużym stopniu decyduje zużycie czynnika roboczego.

Do wyznaczenia modelu matematycznego procesu, którego charakterystyka jest zmienna w czasie, należy przystąpić w dwóch etapach:

- sprawdzić, czy rzeczywiście słuszna jest hipoteza zmienności w czasie charakterystyki procesu,
- wyznaczyć model matematyczny procesu w warunkach addytywnego dryfu czasowego [84].

6.3.1. Sprawdzenie hipotezy zmienności w czasie procesu kulkowania w przypadku badania naprężeń własnych i chropowatości powierzchni warstwy wierzchniej

Warunki badań, mające na celu sprawdzenie słuszności hipotezy zmienności charakterystyki procesu obróbki w czasie, w przypadku badania naprężeń własnych WW były następujące:

- ciśnienie strumienia roboczego  $P_R = 0,2 - 0,5$  MPa,
- kąt natrysku  $\alpha_n = 60^\circ \div 90^\circ$ ,
- stan WW od obróbki poprzedzającej  $S'_{ww}$ , charakteryzowany stanem naprężeń własnych  $\sigma_w = 200$  MPa,
- czas obróbki jednej próbki  $t_m = 30$  s.

Metodykę badań naprężeń własnych opisano w podrozdziale 6.1.

Ze względu na fakt, że metodykę przeprowadzenia podobnego eksperymentu przedstawiono w pracy [84], w niniejszym opracowaniu tok obliczeń podano w znacznym uproszczeniu.

Zrealizowano dwie serie badań w dwugodzinnym odstępie czasowym według podanego programu:

program badań

$x_0$	$x_1$	$x_2$
+	+	+
+	+	-
+	-	+
+	-	-

I seria badań

$P_R$	$\alpha_n$	$\sigma_w$
0,5	90	450
0,5	60	420
0,2	90	320
0,2	60	170

II seria badań

$P_R$	$\alpha_n$	$\sigma_w$
0,5	90	420
0,5	60	360
0,2	90	200
0,2	60	150

ie ustalono, że model matematyczny procesu kulkowania ma następującą postać

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (155)$$

gdzie:

$x_1$  - ciśnienie strumienia  $0,2 \leq P_R \leq 0,5$  MPa,

$x_2$  - kąt natrysku  $60^\circ \leq \alpha_n \leq 90^\circ$ .

Obliczono następnie wartości centralne, wyznaczono jednostki zmienności i poziomy dla poszczególnych zmiennych oraz określono współczynniki regresji. Modele matematyczne dla I i II serii badań przyjęły postaci

$$y_{T1} = 340 + 95x_1 + 45x_2 \quad (156)$$

oraz

$$y_{T2} = 280 + 108x_1 + 28x_2. \quad (157)$$

Obliczono model matematyczny na podstawie całości kształtu zrealizowanych badań. Jego postać jest następująca

$$y = 311 + 101 x_1 + 36 x_2 \quad (158)$$

Następnie zweryfikowano postawioną hipotezę za pomocą testu F Fishera-Snedecora na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  i okazało się, że opracowany model matematyczny jest modelem niezmiennym w czasie.

Na drugim etapie badań wydłużono czas pomiędzy dwiema seriami doświadczeń do 8 h. Zastosowano następujący program badań:

I seria badań			III seria badań		
$P_R$	$\alpha_n$	$\sigma_w$	$P_R$	$\alpha_n$	$\sigma_w$
0,5	90	450	0,5	90	180
0,5	60	420	0,5	60	170
0,2	90	120	0,2	90	130
0,2	60	170	0,2	60	70

Model matematyczny dla III serii badań przyjmuje postać

$$y_{T3} = 140 + 38 x_1 + 18 x_2 \quad (159)$$

Model matematyczny wyznaczony natomiast na podstawie I i III serii badań jest następujący

$$y = 239 + 66 x_1 + 31 x_2 \quad (160)$$

Weryfikacja hipotezy za pomocą testu F Fishera-Snedecora wykazała, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  występuje dryf czasowy modelu matematycznego związany ze zużywaniem się kulek podczas procesu obróbki.

Sprawdzenia hipotezy zmienności w czasie modelu matematycznego obrazującego wpływ warunków kulkowania na chropowatość powierzchni dokonano w dwóch seriach badań w odstępie czasowym wynoszącym 8 h, stosując metodykę badań jak w przypadku naprężeń. Wyniki I i II serii badań były następujące:

I seria badań			II seria badań		
$P_R$	$\alpha_n$	$R_a$	$P_R$	$\alpha_n$	$R_a$
0,5	90	2,6	0,5	90	1,05
0,5	60	2,3	0,5	60	0,79
0,2	90	1,24	0,2	90	0,50
0,2	60	0,85	0,2	60	0,33

Modele matematyczne dla I i II serii badań przyjmują postaci

$$y_{T1} = 1,748 + 0,703 x_1 + 0,173 x_2, \quad (161)$$

$$y_{T2} = 0,668 + 0,253 x_1 + 0,108 x_2. \quad (162)$$

Model matematyczny wyznaczony na podstawie obu serii badań jest następujący

$$y = 1,208 + 0,478 x_1 + 0,14 x_2. \quad (163)$$

Zweryfikowanie hipotezy za pomocą testu F na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  potwierdziło zmienność w czasie modelu matematycznego.

### 6.3.2. Wpływ kulkowania strumieniowego na naprężenia własne i chropowatość powierzchni warstwy wierzchniej w warunkach zmieniającej się charakterystyki procesu

Założone następującą ogólną postać modelu [84]

$$y = b_0(t) + b_1 x_1 + b_2 x_2. \quad (164)$$

Założono ponadto, że człon modelu uwzględniający istniejący addytywny dryf czasowy opisany będzie wielomianem stopnia trzeciego, tj.

$$b_0(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3. \quad (165)$$

Ustalono też liczbę badań na  $N = 12$  przeprowadzanych co 50 minut. Pozostałe warunki badań są zgodne z warunkami opisanymi w paragrafie 6.3.1.

Program badań mających na celu wyznaczenie modelu matematycznego przedstawic można następująco

$$X = W \cdot \phi_m. \quad (166)$$

Z tablicy liczb losowych [84] wybrano zestaw liczb tworzących wektory  $\xi_1$  i  $\xi_2$  celem wyznaczenia macierzy W. Wymiar tej macierzy będzie  $(N - m - 1)k$ , czyli w rozpatrywanym przypadku  $8 \times 2$ , gdzie m jest stopniem wielomianu Czebyszewa, k - liczbą współczynników regresji w modelu matematycznym. Wektory:

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} 0,101 \\ 0,432 \\ 0,555 \\ -0,114 \\ 1,918 \\ -0,739 \\ -0,044 \\ 1,515 \end{bmatrix}; \quad \xi_2 = \begin{bmatrix} 0,013 \\ -0,645 \\ 0,121 \\ -0,476 \\ -0,032 \\ -0,008 \\ 0,942 \\ 0,705 \end{bmatrix}$$



Obliczono wektor  $\xi_2^*$  ze wzoru

$$\xi_2^* = \xi_2 - \rho_{21} \xi_1^* \quad \xi_1^* = \xi_1 \quad (167)$$

gdzie:

$$\rho_{21} = \frac{\sum_{n=1}^8 \xi_1^n \xi_2^n}{\sum_{n=1}^8 (\xi_1^n)^2}$$

Macierz W wyznaczono na podstawie odczytanych liczb losowych korzystając ze wzoru

$$W_{ij} = \frac{\xi_1^{*j}}{\sqrt{\sum_{j=k}^{n-m-1} (\xi_1^{*j})^2}} \quad (168)$$

Wyznaczono macierz  $\psi_m$  o wymiarze 12 x 8. Elementy tej macierzy określono ze wzoru

$$\psi_{ij} = \frac{\varphi_{ij}^j \sqrt{N}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\varphi_{ij}^j)^2}} \quad (169)$$

gdzie wartość  $\varphi_{ij}^j$  oraz  $\sum_{j=1}^N (\varphi_{ij}^j)^2$  odczytano z tablic wielomianów Czebyszewa według [84].

Macierz planowania X obliczona jako iloczyn  $\psi_m$  oraz W wynosi

$$X = \begin{bmatrix} 0,14 & 0,56 \\ -0,78 & -1,21 \\ 1,35 & 0,26 \\ -0,21 & 0,09 \\ -1,67 & 1,04 \\ 1,58 & -0,04 \\ -0,53 & -1,47 \\ 0,29 & -1,65 \\ -0,51 & -1,59 \\ 1,10 & 0,10 \\ -1,16 & 1,15 \\ 0,41 & -0,54 \end{bmatrix}$$

Następnie obliczono wartości centralne, jednostki zmienności i warunki realizacji badań.

Wyniki realizowanych badań dla naprężeń własnych  $\sigma_w$  przedstawiono w tab. 6.

Tabela 6

Wyniki badań naprężeń własnych WW  $\sigma_w$

$P_R$	$\alpha_n$	$\sigma_w$
0,36	80,1	340
0,28	69	360
0,47	77,4	450
0,33	75,8	260
0,20	84,5	220
0,19	74,6	330
0,30	61,6	110
0,38	90	280
0,30	60,5	100
0,44	75,9	260
0,25	85,5	190
0,39	70,1	180

Z kolei obliczono współczynniki regresji. Model matematyczny obrazujący zmiany naprężenia własnego podczas kulkowania strumieniowego w warunkach postępującego w czasie zużycia się kulek przyjął postać

$$\sigma_w = (257 - 66 t + 19 t^2 + 15 t^3) + 49 \frac{P_R - 0,35}{0,09} + 33 \frac{\alpha_n - 75^\circ}{9,09^\circ} \text{ MPa.} \quad (170)$$

Następnie przeprowadzono ocenę istotności współczynników regresji modelu według wzoru

$$t_k = \frac{|b_k|}{S(b)}, \quad (171)$$

gdzie:

$b_k$  - współczynniki regresji,

$S(b)$  - odchylenie standardowe współczynników regresji.

Na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  uznano wpływ współczynników regresji  $a_2$  i  $a_3$  za nieistotny i w związku z tym wyrażenie (170) przyjmie postać

$$\sigma_w = (257 - 66t) + 49 \frac{P_R - 0,35}{0,09} + 33 \frac{\alpha_n - 75^\circ}{9,09^\circ} \text{ MPa.} \quad (172)$$

Ocenę adekwatności modelu przeprowadzono za pomocą testu F i uznano, że na poziomie istotności  $\alpha = 0,01$  opracowany model matematyczny jest adekwatny w określonym zakresie zmian parametrów wejściowych.

Wyniki zrealizowanych badań chropowatości powierzchni  $R_a$  przedstawiono w tab. 7.

Tabela 7

Wyniki badań chropowatości powierzchni  $R_a$

$P_R$	$\alpha_n$	$R_a$
0,36	80,1	1,5
0,28	69	1,82
0,47	77,5	2,84
0,33	75,8	0,96
0,20	84,5	0,71
0,49	74,6	2,1
0,30	61,6	0,45
0,38	90,0	1,77
0,30	60,5	0,33
0,44	75,9	1,43
0,25	85,5	0,75
0,39	70,1	0,87

W obliczeniach modelu matematycznego zastosowano metodykę taką jak w przypadku modelu opisującego tworzenie naprężeń własnych  $\sigma_w$  w WW. Otrzymano następującą końcową postać wzoru dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$

$$R_a = (1,294 - 0,338 t + 0,077 t^3) + 0,477 \frac{P_R - 0,35}{0,09} + 0,199 \frac{\alpha_n - 75^0}{9,09^0} \mu m. \quad (173)$$

Z kolei wyznaczone odpowiednie modele matematyczne dla naprężeń własnych i chropowatości powierzchni z zastosowaniem analizy wymiarowej, stosując metodykę jak poprzednio. Otrzymano dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$

$$\frac{\sigma_w}{E} = 2,16 \cdot 10^{-3} - 0,2485 \cdot 10^{-3} t + 2,66 \cdot 10^{-4} \frac{P_R/H_m - 1,12 \cdot 10^{-4}}{1,39 \cdot 10^{-5}} \quad (174)$$

i

$$R_a \sqrt[3]{\frac{E}{f_0}} = 3,42 \cdot 10^{-4} - 1,168 \cdot 10^{-4} t - 0,767 \cdot 10^{-4} t^3 + 0,574 \cdot 10^{-4} \frac{t_m/f_u - 9,65 \cdot 10^{-3}}{1,33 \cdot 10^{-3}} +$$

$$+ 1,5 \cdot 10^{-4} \frac{P_R/H_m - 1,12 \cdot 10^{-4}}{1,39 \cdot 10^{-5}} \cdot$$

(175)

Wydaje się, że uwzględnianie zmieniających się o charakterystyk procesów technologicznych powinno być powszechnie przyjęte w pracach badawczych. Umożliwia to otrzymywanie wyników znacznie lepiej odzwierciedlających stan rzeczywisty procesu.

#### 6.4. Wpływ obróbki powierzchniowej na odporność korozyjną wybranych materiałów konstrukcyjnych

Badania wpływu obróbki powierzchniowej na odporność wybranego materiału na korozję wżerową (punktową) przeprowadzono na próbkach w kształcie płytek o wymiarach 60x20x1,3 mm wykonanych z materiału EJ736 o składzie chemicznym przedstawionym w tab. 1. Obróbkę wstępną i ciepłą próbek omówiono w podrozdziale 6.1. Następnie wszystkie próbki obrobione przez szlifowanie zbierając naddatek około 0,15 mm. Stosowano ściernice EA32/46/K7C. Po tej obróbce próbki poddano odpuszczeniu w temperaturze 813±10K, celem zapewnienia największej odporności materiału na korozję [2]. Część obrobionych w ten sposób próbek poddano dodatkowo obróbce strumieniowo-ścierniej, kulkowaniu strumieniowemu kulkami szklanymi oraz obróbce strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi.

Parametry obróbki strumieniowo-ścierniej były następujące:

- stosunek wagowy ścierniwa do wody 1:1,
- stosowane ścierniwo - elektrokorund 100,
- kąt natrysku 45°,
- ciśnienie robocze strumienia mieszaniny ścierniwa i wody 0,25 MPa.

Zmiennym parametrem obróbki był czas i wynosił 15 i 30 s. Natomiast parametry kulkowania strumieniowego wynosiły:

- średnica kulek 70 ÷ 150 μm,
- kąt natrysku 90°.

Zmienne parametry obróbki - to: ciśnienie wynoszące 0,25 i 0,45 MPa oraz czas, który wynosił 15 i 30 s.

W przypadku obróbki strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi, przeprowadzono ją przy ciśnieniu  $P_R = 0,25$  MPa w czasie  $t = 20$  s, kulkowanie zaś tych powierzchni przeprowadzono przy ciśnieniu  $P_R = 0,25$  i 0,45 MPa oraz w czasie równym 15 i 30 s.

Parametry poszczególnych sposobów obróbki optymalizowano we wcześniejszych badaniach autora, mając na uwadze możliwości uzyskiwania małej chropowatości obrobionych powierzchni, wprowadzenia do WW maksymalnych naprężeń własnych i dużego zgniotu oraz zapewnienia niskich kosztów prowadzenia procesu obróbki.

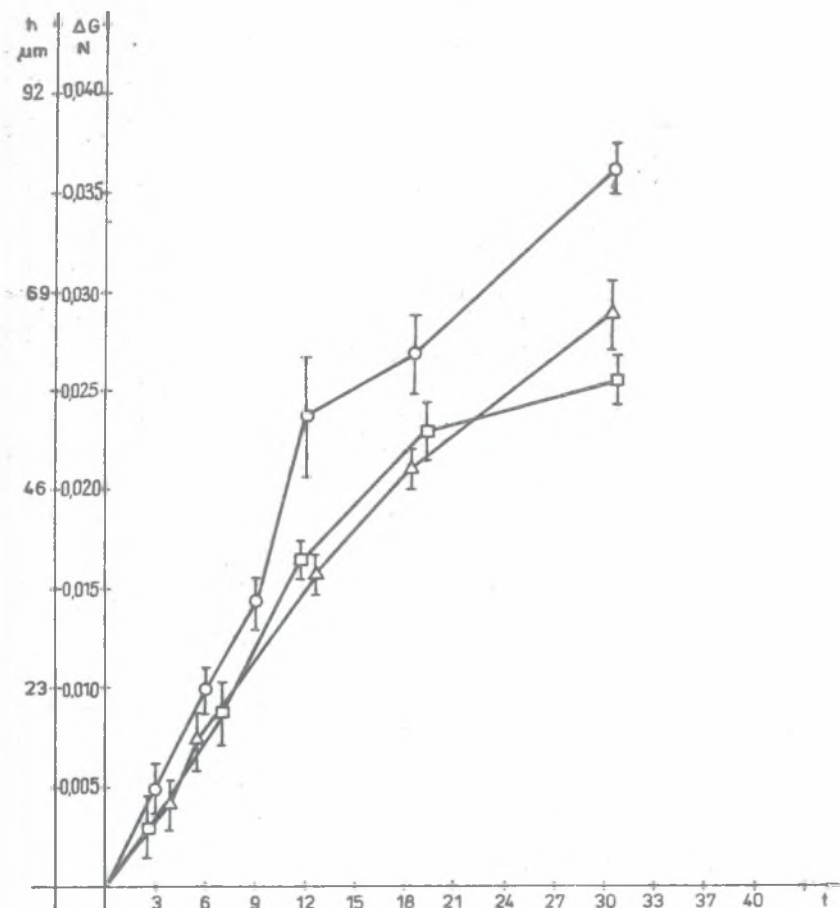
Po szlifowaniu próbki miały strukturę równoległą prostoliniową. Chropowatość  $R_a$  wynosiła około  $0,32 \mu\text{m}$ . Obróbka strumieniowo-ścierna dała strukturę powierzchni zbliżoną do punktowej o  $R_a = 1,25 - 2,5 \mu\text{m}$ , kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi strukturę punktową o  $R_a = 0,32 - 1,25 \mu\text{m}$ .

Inne parametry stanu WW przedstawiały się następująco: Obróbka szlifowaniem wprowadziła do WW naprężenia rozciągające o maksymalnej wartości średniej do  $260 \text{ MPa}$  i głębokości zalegania  $220 \mu\text{m}$ . Wszystkie zaś pozostałe sposoby obróbki ukonstytuowały WW z obecnością naprężeń ściskających o maksymalnej średniej wartości do  $350 \text{ MPa}$  i głębokości zalegania około  $45 \mu\text{m}$  dla obróbki strumieniowo-ścierniej i głębokości ponad  $80 \mu\text{m}$  dla obróbki strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi. We wszystkich badanych przypadkach mikrotwardości strefy o maksymalnym umocnieniu znajdowały się pod powierzchnią WW. Największe przyrosty średniej mikrotwardości w granicach  $300-400 \text{ MPa}$  otrzymane dla obróbki z strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi. Głębokość umocnienia wynosi tu ponad  $100 \mu\text{m}$ .

Próbki po obróbce poddano próbie wrażliwości (czułości) na korozję, posługując się redukująco-utleniającym buforowym działaniem utleniającym soli, którą był 10% roztwór wodny  $\text{FeCl}_3$ . Rodzaj odczynnika dobrano podczas prób wstępnych. Za kryterium porównawcze odporności na korozję badanych próbek, poddanych poszczególnym sposobom obróbki, przyjęto ich ubytki wagowe. Pomiarów dokonano na wadze analitycznej. Przed każdym pomiarem próbki oczyszczano z produktów korozji i odtłuszczano w acetonie. Po zakończeniu badań partii próbek obrobionych danym sposobem obróbki jednej próby zmieniano odczynnik na nowy. Liczebność każdej próby wynosiła 4 próbki. Czas korodowania próbek wynosił 33 h. Ustalono bowiem, że w tym czasie podczas korodowania z każdej strony próbki ubywa warstwa materiału o grubości około  $100 \mu\text{m}$ , co w zasadzie odpowiada grubości konstytuowanej WW przez poszczególne sposoby obróbki [13]. Prędkość korodowania materiału rdzenia próbek powinna być w przybliżeniu jednakowa we wszystkich próbkach.

Dla wszystkich badanych próbek sporządzono wykresy zależności prędkości korodowania próbek w funkcji czasu. Ze względu na podobieństwo krzywych w pracy na rys. 15 przedstawiono tylko wykresy dla próbek po szlifowaniu i obróbce strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem kulkami szklanymi przy  $p_R = 0,25 \text{ MPa}$  i czasie  $t = 30 \text{ s}$  oraz  $p_R = 0,45 \text{ MPa}$  i  $t = 15 \text{ s}$ . Dodatkowa podziałka  $h$  na osi rzędnych to grubość skorodowanej warstwy materiału jednej strony próbek.

We wszystkich próbkach nie stwierdzono istotnych różnic w prędkości korodowania materiału do 6 h. Po tym czasie różnice te się powiększały, największa wystąpiła po szlifowaniu, najmniejsza po kulkowaniu i obróbce strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi. Taki charakter korodowania próbek trwał do 19 h. Po tym czasie różnica w prędkości korodowania we wszystkich próbkach znacznie się zmniejszyła. Przedział czasu, w którym występują maksymalne różnice w prędkości

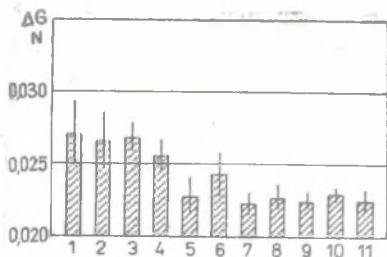


Rys. 15. Zależność ubytku skorodowanego materiału od czasu korodowania próbek po różnych sposobach obróbki powierzchniowej:  
 o - szlifowanie,  $\square$  - obróbka strumieniowo-ścierna z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi,  $p = 0,45$  MPa,  $t = 15$  s,  $\Delta$  - obróbka strumieniowo-ścierna z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi  $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 30$  s

Fig. 15. Dependence of corroded material loss on sample corrosion time after various methods of surface treatment:

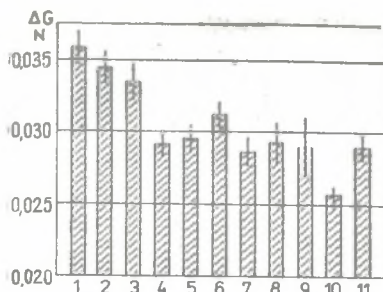
o - grinding  $\square$  - abrasive-blast treatment with additional glass bead peening,  $p = 0.45$  MPa,  $t = 15$  s  $\Delta$  - abrasive-blast treatment with additional glass bead peening,  $p_R = 0.25$  MPa,  $t = 30$  s

korodowania próbek, odpowiada występowaniu maksymalnych naprężeń w WW, w przypadku szlifowania - naprężeń rozciągających, w pozostałych sposobach obróbki - naprężeń ściskających. Oznaczałoby to, że o odporności stali na korozję decyduje rodzaj naprężeń własnych w WW. W celu graficznego zobrazowania ilości skorodowanego materiału w poszczególnych próbkach dla wszy-



Rys. 16. Diagramy ubytku skorodowanego materiału próbek po czasie  $t = 19$  h

Fig. 16. Diagrams of corroded material loss after time  $t = 19$  h



Rys. 17. Diagramy ubytku skorodowanego materiału próbek po czasie  $t = 31$  h

Fig. 17. Diagrams of corroded material loss after time  $t = 31$  h

stkich badanych prób przedstawiono diagramy dotyczące korodowania w ciągu 19 h (rys. 16) i 31 h (rys. 17). Odpowiednie diagramy oznaczają: 1 - szlifowanie, 2 - obróbkę strumieniowo-ścierną,  $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 15$  s, 3 - obróbkę strumieniowo-ścierną,  $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 30$  s, 4 - kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi,  $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 15$  s, 5 - kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi,  $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 30$  s, 6 - kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi,  $p_R = 0,45$  MPa,  $t = 15$  s, 7 - kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi,  $p_R = 0,45$  MPa,  $t = 30$  s, 8 - obróbkę strumieniowo-ścierną z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi,  $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 15$  s, 9 - obróbkę strumieniowo-ścierną z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi,  $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 30$  s, 10 - obróbkę strumieniowo-ścierną z dodatkowymi kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi,  $p_R = 0,45$  MPa,  $t = 15$  s, 11 - obróbkę strumieniowo-ścierną z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi,  $p_R = 0,45$  MPa,  $t = 30$  s.

W celu zaś analitycznego porównania średnich wartości ubytków skorodowanego materiału poszczególnych próbek posłużono się testem hipotezy o porównaniu dwu wartości średnich. Do określenia istotnych różnic w intensywności korozji próbek wybrano próbki po obróbce szlifowaniem jako najmniej odporne na korozję, następnie próbki po obróbce strumieniowo-ścierną przy  $p_R = 0,25$  MPa i  $t = 30$  s, kulkowaniu strumieniowym kulkami szklanymi ( $p_R = 0,25$  MPa,  $t = 30$  s), a także obróbce strumieniowo-ścierną z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi przy  $p_R = 0,25$  MPa i  $t = 30$  s oraz przy  $p_R = 0,45$  MPa i  $t = 30$  s. We wszystkich przypadkach wybrano próby najbardziej reprezentatywne dla danego sposobu obróbki. W przypadku obróbki strumieniowo-ścierną podane parametry umożliwiają zdjęcie warstwy powierzchni o grubości, która została uszkodzona w czasie szlifowania (rysy, przypalenia itp.). W pozostałych przypadkach sposoby obróbki z wyszczególnionymi parametrami umożliwiają wprowadzenie do WK maksymalnego umocnienia i pola naprężeń własnych ściskających z minimalnym stopniem zużycia kulek szklanych. Przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ .

Po czasie korodowania  $t = 19$  h nie stwierdzono istotnych różnic w prędkości korozji próbek po obróbce szlifowaniem i strumieniowo-ścierniej, kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi i strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi oraz w próbkach obrobionych ostatnim sposobem obróbki. Natomiast po czasie korodowania próbek  $t = 31$  h nie stwierdzono istotnej różnicy w prędkości korodowania tylko próbek po obróbce kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi i po obróbce strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi z czasem  $t = 30$  s i ciśnieniem  $0,25$  MPa. Biorąc jednak pod uwagę charakter badań, za reprezentatywniejsze należy uznać wyniki do  $19$  h. Nie stwierdzono większej różnicy w charakterze korozji wszystkich próbek. Chropowatość  $R_a$  powierzchni skorodowanych próbek wahała się w granicach od  $1,6$  do  $2,5$   $\mu\text{m}$ .

Najbardziej odporne na korozję okazały się próbki obrobione kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi i strumieniowo-ściernie z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi. Najmniej odporne były próbki po szlifowaniu. Odporność korozyjna tych ostatnich była mniejsza o około  $40\%$  w porównaniu z próbkami poprzednimi.

Nie stwierdzono istotnej różnicy w odporności na korozję próbek po kulkowaniu strumieniowym kulkami szklanymi i próbek po obróbce strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi. Dlatego też ze względów ekonomicznych jako obróbkę powierzchniową wskazane jest stosować tylko kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi.

Wzrost odporności na korozję próbek należy wiązać z obecnością naprężeń ściskających w WW. Można z tego wyciągnąć wniosek, że w elementach maszyn narażonych na korozję wżerową obecność naprężeń ściskających w WW spowoduje powstanie wżerów o małych rozmiarach, mniej niekorzystnie wpływających na pracę elementów w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

Korozja naprężeniowa stali chromowo-niklowych oraz stopów aluminium należy do bardzo niebezpiecznych typów korozji urządzeń przemysłowych. Na przykład w USA w zakładach chemicznych należących do koncernu Du Pont Company w latach 1968-1969 stwierdzono, że z ogólnej liczby 316 awarii urządzeń spowodowanych korozją  $21,5\%$  było wywołanych korozją naprężeniową [109].

Do badań wytypowano pięć następujących sposobów obróbki: toczenie, szlifowanie, polerowanie, obróbkę strumieniowo-ścierną i kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi. Parametry sposobów obróbki optymalizowano we wcześniejszych badaniach, w aspekcie uzyskiwania małej chropowatości powierzchni i zapewnienia naprężeń ściskających i mikrotwardości o dużych wartościach i dużej głębokości zalegania. Za kryterium określające podatność próbek na pęknięcie korozyjne przyjęto czas do zerwania próbki.

Badania przeprowadzono na stanowisku konstrukcji własnej. Stosowano próbki okrągłe o wymiarach  $\varnothing 3 \times 150$  mm. Oceny chropowatości powierzchni po poszczególnych sposobach obróbki dokonano przez porównanie powierzchni



obrobionych próbek z wzorcami chropowatości. Próbki toczone wykazały chropowatość  $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ , szlifowane i polerowane  $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ , natomiast próbki obrobione strumieniowo-ściernie i kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi  $R_a = 1,25 \mu\text{m}$ . Ponadto ustalono:

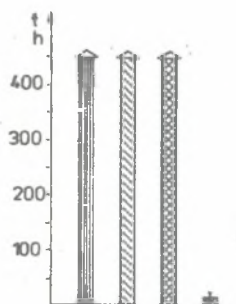
a) napężenie

- dla stopu PA9 - 250 MPa,
- dla stali 1H18N9 - 300 MPa;

b) środowisko korozyjne

- dla stopu Pa9 - 10% roztwór  $\text{MgCl}_2$  wrzący w temperaturze 383 K,
- dla stali 1H18N9 - 47% roztwór  $\text{MgCl}_2$  wrzący w temperaturze 427 K.

Do analizy wyników badań zastosowano test hipotezy o porównaniu dwu wartości średnich. Przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . Wyniki badań dla stali 1H18N9 przedstawiono na rys. 18.

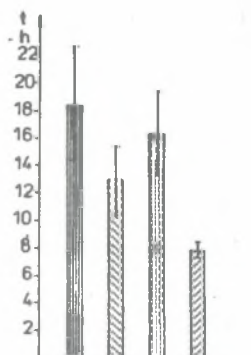


Rys. 18. Odporność na korozję naprężeniową stali 1H18N9 w zależności od sposobu obróbki powierzchniowej:

▨ - obróbka strumieniowo-ścierna z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi, ▩ - obróbka strumieniowo-ścierna, ▤ - kulkowanie kulkami szklanymi, ▥ - szlifowanie i polerowanie

Fig. 18. Resistance to stress corrosion of 1H18N9 steel depending on surface treatment method:

▨ - abrasive-blast treatment with additional glass bead peening ▩ - abrasive-blast treatment ▤ - glass bead peening ▥ - grinding and polishing



Rys. 19. Odporność na korozję naprężeniową stopu PA9 w zależności od sposobu obróbki powierzchniowej:

▨ - obróbka strumieniowo-ścierna z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi, ▩ - kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi, ▤ - obróbka strumieniowo-ścierna, ▥ - toczenie

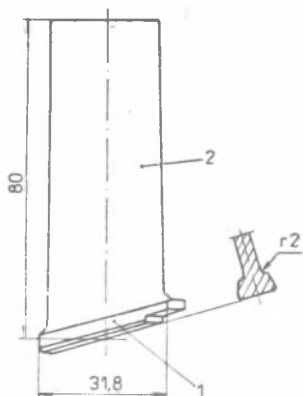
Fig. 19. Resistance to stress corrosion of Pa9 alloy depending on surface treatment method:

▨ - abrasive-blast treatment with additional glass bead peening ▩ - glass bead peening ▤ - abrasive-blast treatment ▥ - turning

Istotny wpływ sposobu obróbki powierzchniowej podczas badania stali 1H18N9 dał się zauważyć dla kulkowania, obróbki strumieniowo-ścierniej oraz połączenia tych sposobów obróbki. Stwierdzono ponad dwumastokrotny wzrost odporności na korozję próbek po obróbce strumieniowo-ścierniej, kulkowaniu strumieniowym kulkami szklanymi i obróbce strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi w stosunku do próbek po szlifowaniu i polerowaniu. Nie oznacza to jednak, że usunięto skłonność do pękania korozyjnego próbek. Wyjaśnienie tego problemu wymaga prowadzenia dodatkowych badań, szczególnie w zakresie prób długotrwałych.

Wyniki badań dla stopu PA9 przedstawiono graficznie na rys. 19. Z przeprowadzonego testu wynika, że największe różnice pomiędzy wartościami średnimi występują porównując toczenie z obróbką strumieniowo-ścierną oraz toczenie z obróbką strumieniowo-ścierną i dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi. Dla obróbki strumieniowo-ścierniej z dodatkowym kulkowaniem w porównaniu z próbkami obrobionymi tylko strumieniowo-ściernie test nie wykazał istotnych różnic.

#### 6.5. Wpływ wybranych sposobów obróbki powierzchniowej na trwałość i niezawodność elementów maszyn



Rys. 20. Łopátka sprężarki:

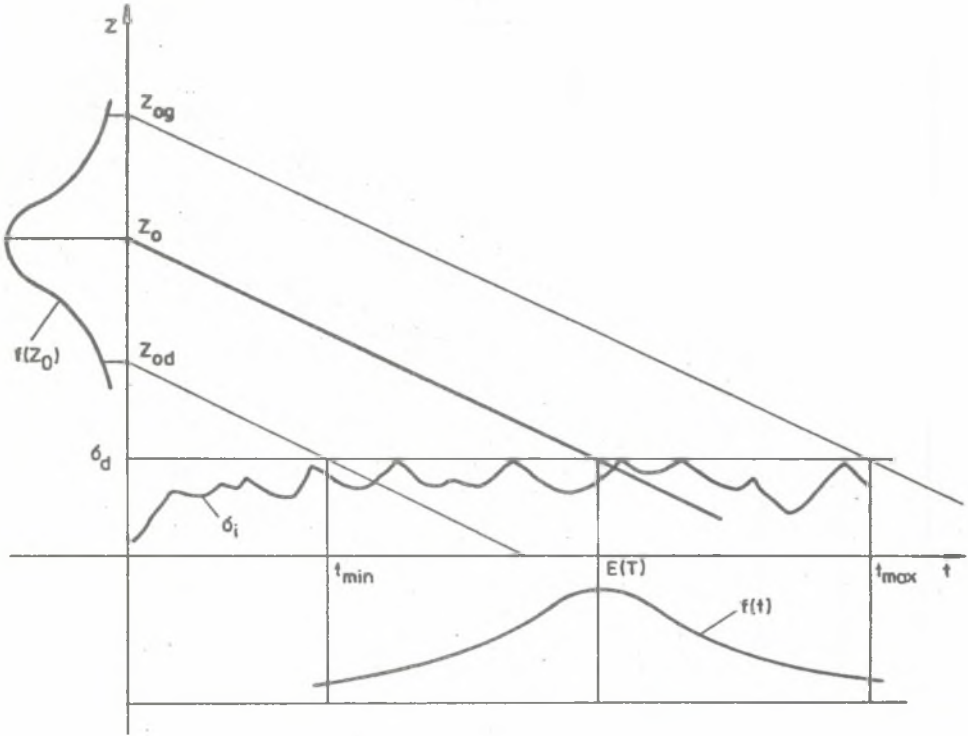
1- stopka, 2 - pióro

Fig. 20. Compressor blade:

1- root, 2 - airfoil

Jako przedmiot badań stosowano łopátki sprężarki silnika turbospalinowego. Wygląd łopátki przedstawiono na rys. 20. Najistotniejszym parametrem właściwości WV piór łopatek w aspekcie trwałości i niezawodności tych elementów jest wytrzymałość zmęczeniowa  $Z$ . Czynnikiem roboczym natomiast jest tu obciążenie dynamiczne o charakterze ustabilizowanym [100] o średniej wartości określonej zależnością (49). Ze względu na fakt, że łopátka pracuje w zakresie wysokiej częstości zmian obciążenia, obciążenie dynamiczne można traktować jako stałe o wartości równej maksymalnej amplitudzie obciążenia.

Trwałość łopatek określono ze wzorów (90) i (95). Założono stacjonarny proces ich starzenia. Zmienną losową trwałości łopatek aproksymowano rozkładem normalnym (rys. 21). Z kolei współczynniki  $B$  i  $a$  ze wzoru (89) obliczono przy założeniu 20% spadku wytrzymałości  $Z_t$  w stosunku do  $Z_0$  w czasie 200 h eksploatacji samolotu. Wyznaczone doświadczalnie  $G_H$  wyniosło 172 MPa.



Rys. 21. Schemat powstawania uszkodzenia łopatek  
 Fig. 21. Scheme of generation of blade failure

Biorąc pod uwagę specyfikę pracy łopatek, określono czas ich pracy  $t$  [h] bez ryzyka, tzn. taki, dla którego  $R(t) = 1,0$ . Wytrzymałość zmęczeniową łopatek  $Z_0$  wyznaczono metodą schodkową, przy liczebności próby = 30 łopatek.

Wyjściową obróbką powierzchniową piór było ręczne szlifowanie i polewowanie. Jako dodatkowe sposoby obróbki zastosowano obróbkę strumieniowo-ścierną, kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi i obróbkę strumieniowo-ścierną z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi.

Wyniki badań parametrów stanu WW i wytrzymałości zmęczeniowej  $Z_0$  łopatek zestawiono w tab. 8. Natomiast w tab. 9 przedstawiono wartości obliczonych wskaźników  $E(T)$  i  $t$  [h] dla 5, 10 i 15% spadku wytrzymałości zmęczeniowej łopatek. Wskaźnik  $t$  [h] obliczono tu w zakresie do 1200 h. Mniejsze spadki wytrzymałości zmęczeniowej łopatek w czasie ich eksploatacji są niewątpliwie związane ze zwiększeniem odporności tych elementów, głównie na zużycie korozyjne. Odporność tę zwiększają właśnie eksponowane dodatkowe sposoby obróbki powierzchniowej.

Z przedstawionych danych wynika, że zastosowanie dodatkowych sposobów obróbki powierzchniowej piór łopatek znacznie zwiększa zarówno trwałość

Tabela 8

Zestawienie wartości parametrów stanu WW i wytrzymałości zmęczeniowej piór łopatek po różnych sposobach obróbki powierzchniowej

Sposób obróbki	Szlifowanie i polerowanie	Obróbka strumieniowo-ścierna	Kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi	Obróbka strumieniowo-ścierna z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi
Wielkość				
Rodzaj naprężeń własnych	rozciągające	ściskające	ściskające	ściskające
Maksymalna wartość średnich naprężeń, MPa	420	330	255	425
Głębokość zalegania naprężeń w WW, $\mu\text{m}$	220,0	45,0	30,0	83,0
Maksymalny przyrost średniej wartości mikro-twardości $\mu\text{HK}/300$ , MPa	300	250	180	310
Rodzaj struktury geometrycznej powierzchni WW	równoległa prostoliniowa	bezkierunkowa	bezkierunkowa	bezkierunkowa
Wysokość chropowatości powierzchni $R_a$ , $\mu\text{m}$	0,31	1,25-2,5	0,16-0,32	0,32-1,25
Średnia wartość wytrzymałości zmęczeniowej łopatek $Z_0$ , MPa	548,6	619,3	627,5	657,9

łopatek, jak i czas pracy bez ryzyka, przy czym większy przyrost otrzymano dla ostatniego wskaźnika. Związane jest to przede wszystkim ze zmniejszeniem się odchylenia standardowego wytrzymałości zmęczeniowej łopatek po obróbce strumieniowo-ścierniej i kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi. Odchylenie to wyniosło dla szlifowania i polerowania 44,3 MPa, dla obróbki strumieniowo-ścierniej 28,2 MPa, a dla kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi 29,4 MPa.

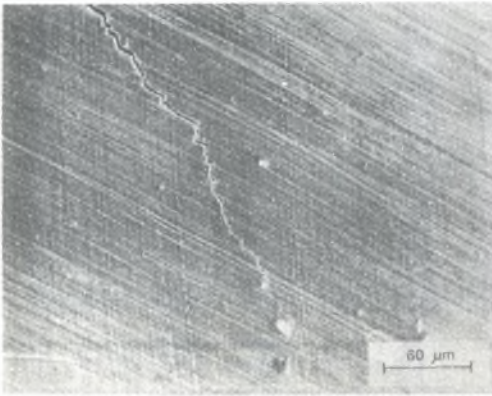
Przedstawione dane wskazują, jak duże istnieją możliwości poprawy trwałości i niezawodności elementów metodami technologicznymi.

Na rys. 22 pokazano przebieg pęknięcia zmęczeniowego na tle struktury WW powierzchni pióra łopatek, obrobionej za pomocą szlifowania i polerowania. Widać tu wyraźny wpływ kierunkowości struktury na przebieg pęknięcia. Nie można natomiast zauważyć żadnego związku pomiędzy charakterem struktury a przebiegiem pęknięcia zmęczeniowego w przypadku obróbki piór łopatek metodą strumieniowo-ścierną i kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi (rys. 23).

Tabela 9

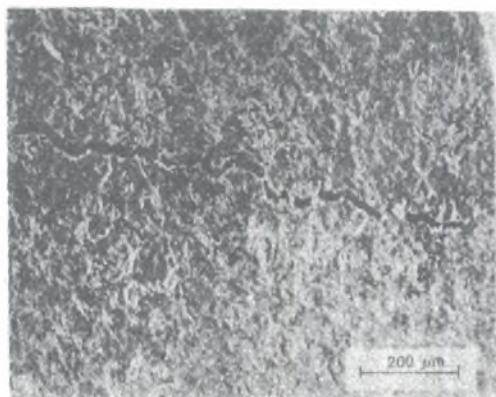
Wyniki obliczeń  $R(T)$  i  $t [h]$  dla 5, 10 i 15 spadku wytrzymałości zmęczeniowej łopatek

Sposób obróbki	spadek %	$R(T) [h]$ wg zależności (91)	$t [h]$ dla $R(t) =$	$R(T) [h]$ wg zależności (96)	$t [h]$ dla $R(t) = 1$
Szlifowanie i polerowanie	5	4933	1000	3026	1100
	10	2900	1000	1509	500
	15	1850	800	1033	300
	20	1345	600	770	200
Obróbka strumieniowo-scierna	5	5333	1000	3530	1000
	10	3200	1000	1830	1000
	15	2000	1000	1205	700
	20	1454	1000	898	500
Kulkowanie strumieniowe kulkami szklanymi	5	5367	1000	3585	-
	10	3220	1000	1861	1000
	15	2013	1000	1225	700
	20	1468	1000	913	500
Obróbka strumieniowo-scierna z dodatkowym kulkowaniem strumieniowym kulkami szklanymi	5	5533	1000	3806	1000
	10	3220	1000	1973	1000
	15	2075	1000	1299	600
	20	1509	1000	968	400



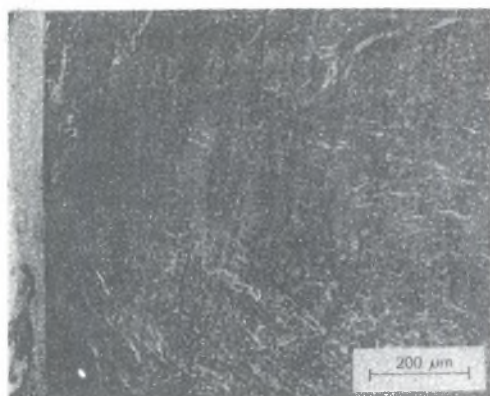
Rys. 22. Widok złomu zmęczeniowego na powierzchni pióra łopatek otrzymany z mikroskopu skaningowego. Pióro obrobione za pomocą szlifowania i polerowania

Fig. 22. View of fatigue fracture on airfoil surface taken by means of a scanning microscope. Airfoil ground and polished



Rys. 23. Widok złomu zmęczeniowego na powierzchni pióra łopatkki otrzymany z mikroskopu skaningowego. Pióro obrobione obróbką strumieniowo-ścierną i kulowaniem strumieniowym kulkami szklanymi

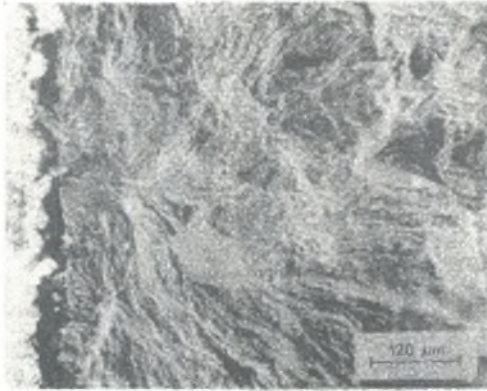
Fig. 23. View of fatigue fracture on airfoil surface taken by means of a scanning microscope. Airfoil abrasive-blast treated and glass bead peened



Rys. 24. Ognisko zmęczeniowe i strefa przyogniskowa. Pióro łopatkki obrobione za pomocą szlifowania i polerowania

Fig. 24. Fatigue seat and its periphery. Airfoil ground and polished

Strukturę złomu zmęczeniowego łopatkki po szlifowaniu i polerowaniu pokazano na rys. 24. Widać, że ognisko zmęczeniowe nie ma charakteru punktowego, lecz rozłożone jest na określonym obszarze tuż przy powierzchni. Złom ma charakter transkryystaliczny z pojedynczymi fragmentami międzykryystalicznymi.



Rys. 25. Ognisko zmęczeniowe i strefa przyogniskowa. Pióro łopatkii obró-  
bione obróbką strumieniowo-ścierną i kulkowaniem strumieniowym kulkami  
szklanymi

Fig. 25. Fatigue seat and its periphery. Airfoil abrasive-blast treated  
and glass bead peened

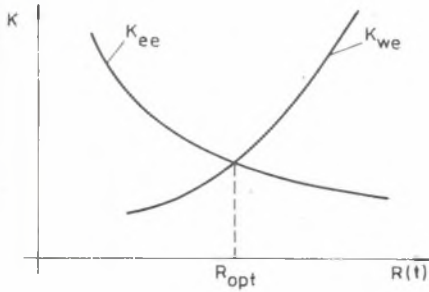
Na rys. 25 przedstawiono strukturę ziomu zmęczeniowego łopatkii po ob-  
róbce strumieniowo-ścierną i kulkowaniu strumieniowym kulkami szklanymi.  
Sam ziom ma charakter podobny do ziomu poprzedniego, jednak ognisko zmę-  
czeniowe jest tu zlokalizowane w dalszej odległości od powierzchni wł.  
Potwierdzone zostało tym samym stwierdzenie, że naprężenia ściskające i  
umocnienie prowadzą ogniska zmęczeniowe pod powierzchnię wł.

#### 5.6. Zastosowanie bayesowskiej teorii decyzji do wyboru obróbki powierzchniowej łopatek sprężarki silnika turbospalinowego

W trakcie ustalania najwłaściwszego poziomu trwałości i niezawodności  
każdej klasy elementów powinno się brać pod uwagę zarówno koszty wytwarza-  
nia, jak i koszty użytkowania tych elementów. Kształtowanie się kosztów  
wytwarzania i użytkowania elementów pokazano na rys. 26. Dla danej klasy  
elementów optymalny poziom niezawodności determinuje minimalna suma koszt-  
ów: wytwarzania  $K_{we}$  i użytkowania eksploatacji  $K_{ee}$ , a więc musi być speł-  
niony warunek

$$K = K_{we} + K_{ee} \rightarrow \text{minimum.} \quad (176)$$

Przedsięwzięcie dotyczące ustalenia właściwej trwałości i niezawodno-  
ści jest więc bardzo trudne i w obecnych warunkach, przy braku zazwyczaj  
kompletnego banku informacji o wspomnianych kosztach, nie zawsze możliwe  
nawet z wykorzystaniem istniejących i stosowanych metod optymalizacyj-  
nych w technice. Stąd też bardzo cenne wydają się te metody, które umo-



rys. 26. Wpływ niezawodności na kształtowanie się kosztów wytwarzania i użytkowania elementów  
Fig. 26. Effect of reliability on manufacturing and operating costs of elements

Wszystko to pozwala przybliżyć procedurę wyboru technologii do aktualnych warunków ekonomicznych i technicznych nawet danego przedsiębiorstwa. Najważniejszą praktyczną zaletą bayesowskiej teorii decyzji - to niewątpliwie możliwość podjęcia szybkiej decyzji przy wyborze procesu technologicznego elementów z uwzględnieniem wyników ekonomicznych, technicznych i jakościowych. Ważne jest to szczególnie w uruchamianiu produkcji nowych wyrobów.

Metodę tę zastosowano do wyboru sposobu obróbki powierzchniowej w zamiarze ukształtowania określonego poziomu trwałości i niezawodności łopatek sprężarki silnika turbospalinowego.

W eksperymencie uwzględniono osiem sposobów obróbki powierzchniowej łopatek sprężarki, które są działaniami elementarnymi  $a_i$  i przedstawiają się następująco:

- $a_0$  - polerowanie + obróbka strumieniowo-ścierna + kulowanie strumieniowe kulkami szklanymi,
- $a_1$  - obróbka elektrochemiczna + strumieniowo-ścierna + kulowanie strumieniowe kulkami szklanymi,
- $a_2$  - obróbka elektroerozyjna + elektrochemiczna + strumieniowo-ścierna + kulowanie strumieniowe kulkami szklanymi,
- $a_3$  - obróbka elektroerozyjna + elektrochemiczna + kulowanie strumieniowe kulkami szklanymi,
- $a_4$  - polerowanie + kulowanie strumieniowe kulkami szklanymi,
- $a_5$  - polerowanie + strumieniowo-ścierna,
- $a_6$  - polerowanie,
- $a_7$  - elektrochemiczna.

zliwiają dostarczanie informacji co do podejmowania decyzji, o charakterze technicznym w warunkach niepewności.

Na uwagę zasługuje tu bayesowska statystyczna teoria decyzji [10, 66, 98, 121]. Umożliwia ona analizę kosztów w powiązaniu z określonymi wariantami technologii, z uwzględnieniem losowego charakteru procesów wytwarzania elementów. Inną zaletą to możliwość uzupełniania zgromadzonych informacji o danym procesie poprzez przeprowadzenie dodatkowych eksperymentów.



Tabela 10

## Orientacyjne koszty produkcji łopatk

Rodzaj obróbki, powierzeniowej	Koszt materiału		Robocizna		Koszt zakupu materiałów		Koszty wydziałowe		Koszty ogólnozakładowe		Koszty braków		Koszty zbytu		Koszty własne jednostkowe	
	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł	zł
Polerowanie	147		43,30		7,35		476,30		3117,60		303,30		61,40		4156,30	
Elektrochemiczna	147		7		7,35		77		504		59,40		12		813	
Polerowanie + strumieniowo-sciera	147		43,50		7,35		478,50		3132		304,70		61,70		4174,80	
Polerowanie + kulowanie	147		43,40		7,35		477,40		3124,80		303,90		61,50		4165	
Polerowanie + strumieniowo-sciera + kulowanie	147		43,70		7,35		480,70		3146,40		306		62		4193,30	
Elektroerozyjna + elektrochemiczna + kulowanie	147		11,50		7,35		126,50		828		89,60		18,20		1220,80	
Elektrochemiczna + strumieniowo-sciera + kulowanie	147		7,40		7,35		81,40		532,80		61,50		12,60		850	
Elektroerozyjna + elektrochemiczna + strumieniowo-sciera + kulowanie	147		11,70		7,35		128,70		842,40		90		18,40		1243,50	

Założono, że minimalny czas pracy łopatkki wynosi 200 h. Stąd wynika, że możliwe są dwa stany natury:  $\theta_0$  - łopatkka pracuje 200 lub więcej h,  $\theta_1$  - łopatkka pracuje mniej niż 200 h. Konsekwencje każdej pary: działania elementarne - stan można przedstawić na drzewie decyzyjnym jako zysk lub stratę. Zysk lub stratę dla każdego sposobu obróbki określono na podstawie orientacyjnie obliczonych kosztów produkcji łopatkki (tab. 10).

W zależności od tego, czy łopatkka będzie pracowała przez założony czas trwałości dla danej obróbki, otrzymuje się odpowiedni zysk wynikający z czasu pracy łopatkki ponad 200 h. Jeżeli ulegnie zniszczeniu przed upływem minimalnego czasu pracy 200 h, otrzymuje się stratę równą orientacyjnemu kosztowi produkcji. Prawdopodobieństwo aprioryczne stanu założono następująco:  $P'(\theta_0) = 0,7$ ,  $P'(\theta_1) = 0,3$ . Za dodatkowe źródła informacji przyjęto dwa doświadczenia  $e_1, e_2$ , polegające na pomiarze parametru chropowatości  $R_a$  i pomiarze naprężeń własnych  $\sigma_w$ . Założono, że przestrzeń zdarzeń elementarnych możliwych wyników obu doświadczeń jest dyskretna: dla pomiaru  $R_a$  o trzech wartościach. Wyniki doświadczeń podsumowane w tabelach wiarygodności próby, czyli prawdopodobieństwa poszczególnych prób dla każdego stanu natury. Wiarygodność próby  $P(z_k/\theta_1, e_1)$  dla pomiaru chropowatości  $R_a$  przedstawiono w tab. 11.

Tabela 11  
Wiarygodność próby  $P(z_k/\theta_1, e_1)$  dla pomiaru chropowatości  $R_a$

Stan prawdziwy		Wynik próby $z_k$	
		$\theta_0$	$\theta_1$
$z_0$	$R_a = 0,16 \mu\text{m}$	0,6	0,1
$z_1$	$R_a = 0,63 \mu\text{m}$	0,1	0,7
$z_2$	$R_a = 0,32 \mu\text{m}$	0,3	0,2

Dwa z tych możliwych wyników można nazwać sprzyjającymi konkretnemu stanowi natury, natomiast wynik trzeci,  $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ , jest dwuznaczny. Wiarygodność próby  $P(z_k/\theta_1, e_2)$  dla pomiaru naprężeń własnych  $\sigma_w$  zestawiono w tab. 12.

W przypadku pomiaru parametru  $R_a$  koszt doświadczenia wynosi 90 zł i w celu otrzymania korzyści całkowitych konsekwencji związanych z nieprzeprowadzaniem żadnego doświadczenia należy odjąć tę wartość od odpowiednich korzyści.

Operacja pomiaru naprężeń jest bardziej rzetelna, ale i bardziej kosztowna, co odbija się w odjęciu przyjętego z założenia kosztu 240 zł od innych korzyści.

Tabela 12

Wiarygodność próby  $P(z_k/0_1, e_2)$  dla podiaru naprężeń własnych  $\sigma_w$

Stan prawdziwy		$\theta_0$	$\theta_1$
Wynik próby $z_k$			
$z_0$	$\sigma_w^- = 300 - 500 \text{ MPa}$	0,9	0,1
$z_1$	$\sigma_w^+ = 0 - 150 \text{ MPa}$	0,1	0,9

$\sigma_w^-$  - naprężenia ściskające,

$\sigma_w^+$  - naprężenia rozciągające.

Na rys. 27 przedstawiono drzewo decyzyjne bez uwzględnienia prawdopodobieństwa. Dla gałęzi  $e_0$ , oznaczającej niewykonanie żadnego doświadczenia (nic nie zaobserwowano) prawdopodobieństwo stanu jest aprioryczne. Wartości oczekiwane dla poszczególnych działań elementarnych wynoszą odpowiednio

$$E[u(e_0, z, a_0)] = P'(\theta_0) u(e_0, z, a_0, \theta_0) + P'(\theta_1) u(e_0, z, a_0, \theta_1) =$$

$$= 0,7 \cdot 2995 + 0,3 (-4193) = 839,$$

$$E[u(e_0, z, a_1)] = 0,7 \cdot 567 + 0,3 (-850) = 142,$$

$$E[u(e_0, z, a_2)] = 0,7 \cdot 831 + 0,3 (-1246) = 255,$$

$$E[u(e_0, z, a_3)] = 0,7 \cdot 811 + 0,3 (-1221) = 204,$$

$$E[u(e_0, z, a_4)] = 0,7 \cdot 2650 + 0,3 (-4165) = 606,$$

$$E[u(e_0, z, a_5)] = 0,7 \cdot 2657 + 0,3 (-4175) = 607,$$

$$E[u(e_0, z, a_6)] = 0,7 \cdot 2078 + 0,3 (-4156) = 208,$$

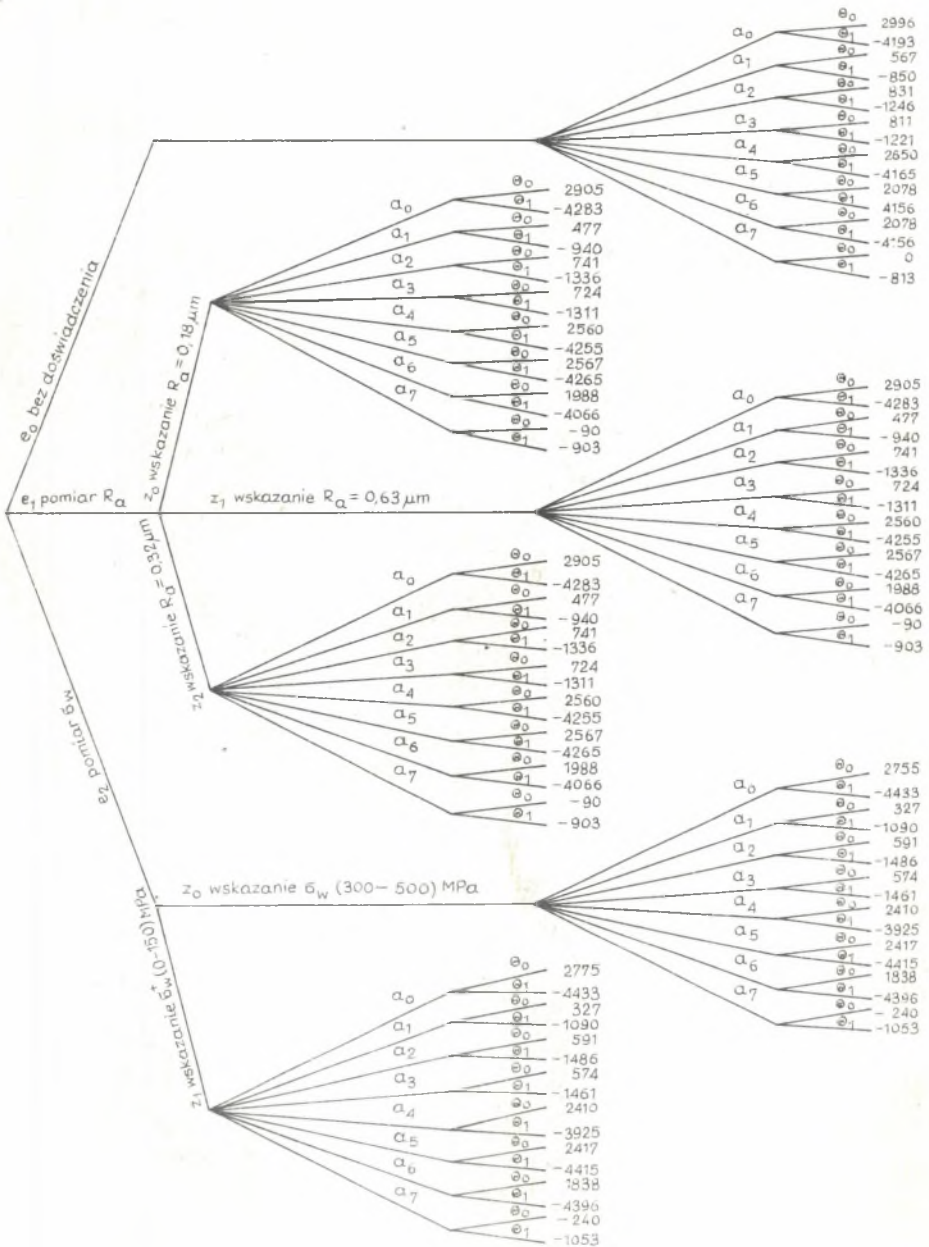
$$E[u(e_0, z, a_7)] = 0,7 \cdot 0 + 0,3 (-313) = -244$$

Oczekiwana korzyść

$$u^*(e_0, z) = \max \{ E[u(e_0, z, a)] \}, \quad (177)$$

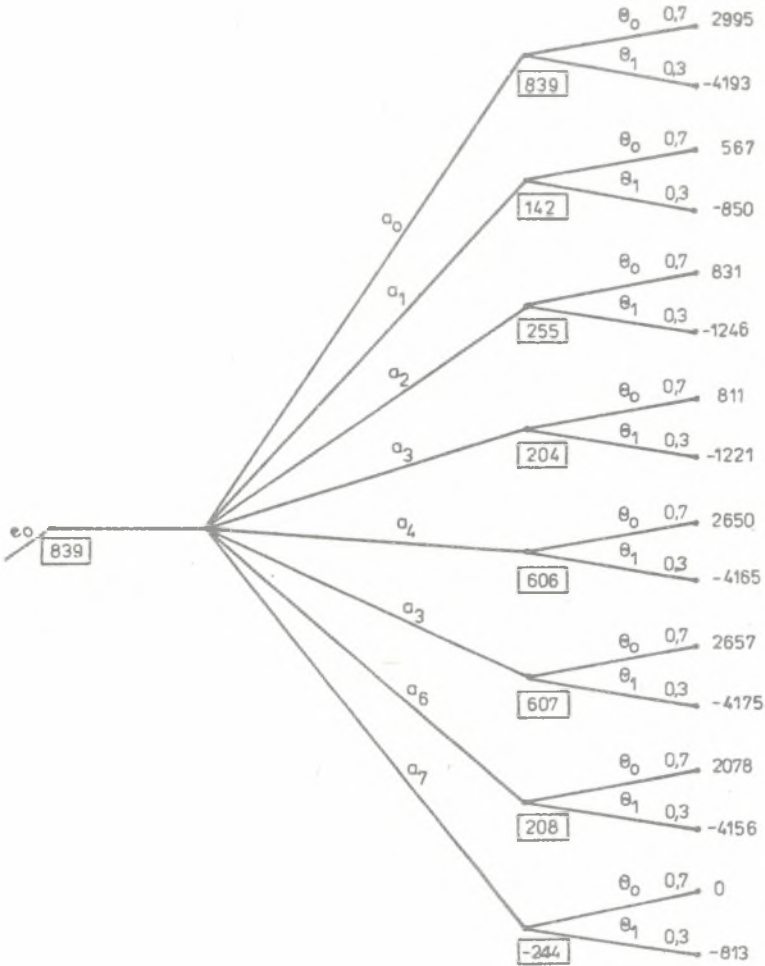
$$u^*(e_0, z) = \max (839, 142, 255, 204, 606, 607, 208, -244),$$

$$u^*(e_0, z) = 839.$$



Rys. 27. Drzewo decyzyjne bez uwzględnienia prawdopodobieństwa  
 fig. 27. decision tree without consideration of probability

Odpowiednie drzewo decyzyjne przedstawiono na rys. 28. Rozpatrzono następnie gałąź  $e_1$ , czyli gałąź doświadczenia polegającego na pomiarze parametru chropowatości  $R_a$ .



Rys. 28. Drzewo decyzyjne wyboru sposobu obróbki (gałąź bez dodatkowej informacji)

Fig. 28. Decision tree for selection of treatment method (branch without additional information)

1. Wynikiem próby jest  $z_0$ , czyli  $R_a = 0,16 \mu\text{m}$ . Prawdopodobieństwo aposterioryczne określono ze wzorów

$$P''(\theta_0) = P(\theta_0/z_0, e_1) = NP(z_0/\theta_0, e_1) \quad P'(\theta_0), \quad (178)$$

$$P(\theta_0/z_0, e_1) = N 0,6 \cdot 0,7 = N 0,42 = 0,94,$$

$$P''(\theta_1) = P(\theta_1/z_0, e_1) = NP(z_0/\theta_1, e_1) \quad P'(\theta_1), \quad (179)$$

$$P(\theta_1/z_0, e_1) = N 0,1 \cdot 0,3 = N 0,03 = 0,06,$$

gdzie stała normująca:

$$N = \frac{1}{0,42 + 0,03} = \frac{1}{0,45}.$$

Mnożąc prawdopodobieństwo aposterioryczne przez odpowiednie korzyści i sumując je otrzymano oczekiwane korzyści

$$\begin{aligned} E[u(e_1, z_0, a_0)] &= u(e_1, z_0, a_0, \theta_0) P(\theta_0/z_0, e_1) + \\ &\quad + u(e_1, z_0, a_0, \theta_1) P(\theta_1/z_0, e_1) = \\ &= 2905 \cdot 0,94 + (-4283) 0,06 = 2474, \end{aligned}$$

$$E[u(e_1, z_0, a_1)] = 477 \cdot 0,94 + (-940) 0,06 = 392,$$

$$E[u(e_1, z_0, a_2)] = 741 \cdot 0,94 + (-1136) 0,06 = 616,$$

$$E[u(e_1, z_0, a_3)] = 724 \cdot 0,94 + (-1311) 0,06 = 602,$$

$$E[u(e_1, z_0, a_4)] = 2560 \cdot 0,94 + (-4255) 0,06 = 2151,$$

$$E[u(e_1, z_0, a_5)] = 2567 \cdot 0,94 + (-4265) 0,06 = 2157,$$

$$E[u(e_1, z_0, a_6)] = 1988 \cdot 0,94 + (-4066) 0,06 = 1625,$$

$$E[u(e_1, z_0, a_7)] = -90 \cdot 0,94 + (-903) 0,06 = -138.$$

Oczekiwane korzyści

$$u^*(e_1, z_0) = \max_a \{E[u(e_1, z_0, a_i)]\}, \quad (180)$$

$$u^*(e_1, z_0) = \max_a (2474, 392, 616, 602, 2151, 2157, 1625, -139),$$

$$u(e_1, z_0) = 2474.$$

2. Wynikiem próby jest  $z_1$ , czyli  $R_a = 0,63 \mu\text{m}$

$$P''(\theta_0) = P(\theta_0/z_1, e_1) = N P(z_1/\theta_0, e_1) P'(\theta_0), \quad (181)$$

$$P(\theta_0/z_1, e_1) = N 0,1 \cdot 0,7 = N 0,07 = 0,25,$$

$$P''(\theta_1) = P(\theta_1/z_1, e_1) = N P(z_1/\theta_1, e_1) P'(\theta_1), \quad (182)$$

$$P(\theta_1/z_1, e_1) = N 0,7 \cdot 0,3 = N 0,21 = 0,75,$$

gdzie:

$$N = \frac{1}{0,07 + 0,21} = \frac{1}{0,28}.$$

$$E[u(e_1, z_1, a_0)] = 2905 \cdot 0,25 + (-4283) 0,75 = -2486,$$

$$E[u(e_1, z_1, a_1)] = 477 \cdot 0,25 + (-940) 0,75 = -586,$$

$$E[u(e_1, z_1, a_2)] = 741 \cdot 0,25 + (-1336) 0,75 = -817,$$

$$E[u(e_1, z_1, a_3)] = 724 \cdot 0,25 + (-1311) 0,75 = -802,$$

$$E[u(e_1, z_1, a_4)] = 2560 \cdot 0,25 + (-4255) 0,75 = -2551,$$

$$E[u(e_1, z_1, a_5)] = 2567 \cdot 0,25 + (-4265) 0,75 = -2557,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_6)] = 1988 \cdot 0,25 + (-4066) 0,75 = -2553,$$

$$E[u(e_1, z_1, a_7)] = -90 \cdot 0,25 + (-903) 0,75 = -700.$$

Oczekiwana korzyść

$$u^*(e_1, z_a) = \max_a \{E[u(e_1, z_1, a)]\}, \quad (183)$$

$$u^*(e_1, z_1) = \max_a (-2486, -586, -817, -802, -2551, -2557, -2553, -700),$$

$$u^*(e_1, z_1) = -586.$$

3. Wynikiem próby jest  $z_2$ , czyli  $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ .

$$P''(\theta_0) = P(\theta_0/z_2, e_1) = N P(z_2/\theta_0, e_1) P'(\theta_0), \quad (184)$$

$$P(\theta_0/z_2, e_1) = N 0,3 \cdot 0,7 = N 0,21 = 0,77,$$

$$P'(\theta_1) = P(\theta_1/z_2, e_1) = N P(z_2/\theta_1, e_1) P'(\theta_1), \quad (185)$$

$$P(\theta_1/z_2, e_1) = N 0,2 \cdot 0,3 = N 0,06 = 0,23,$$

gdzie:

$$N = \frac{1}{0,21 + 0,06} = \frac{1}{0,27}$$

$$E[u(e_1, z_2, a_0)] = 2905 \cdot 0,77 + (-4283) 0,23 = 1252,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_1)] = 477 \cdot 0,77 + (-940) 0,23 = 151,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_2)] = 741 \cdot 0,77 + (-1336) 0,23 = 263,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_3)] = 724 \cdot 0,77 + (-1311) 0,23 = 256,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_4)] = 2560 \cdot 0,77 + (-4255) 0,23 = 993,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_5)] = 2567 \cdot 0,77 + (-4265) 0,23 = 996,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_6)] = 1988 \cdot 0,77 + (-4066) 0,23 = 596,$$

$$E[u(e_1, z_2, a_7)] = -90 \cdot 0,77 + (-903) 0,23 = -277.$$

Oczekiwana korzyść

$$u^*(e_1, z_2) = \max_a \{ E[u(e_1, z_2, a)] \}, \quad (186)$$

$$u^*(e_1, z_2) = \max_a (1252, 151, 263, 256, 993, 996, 596, -277),$$

$$u^*(e_1, z_2) = 1252.$$

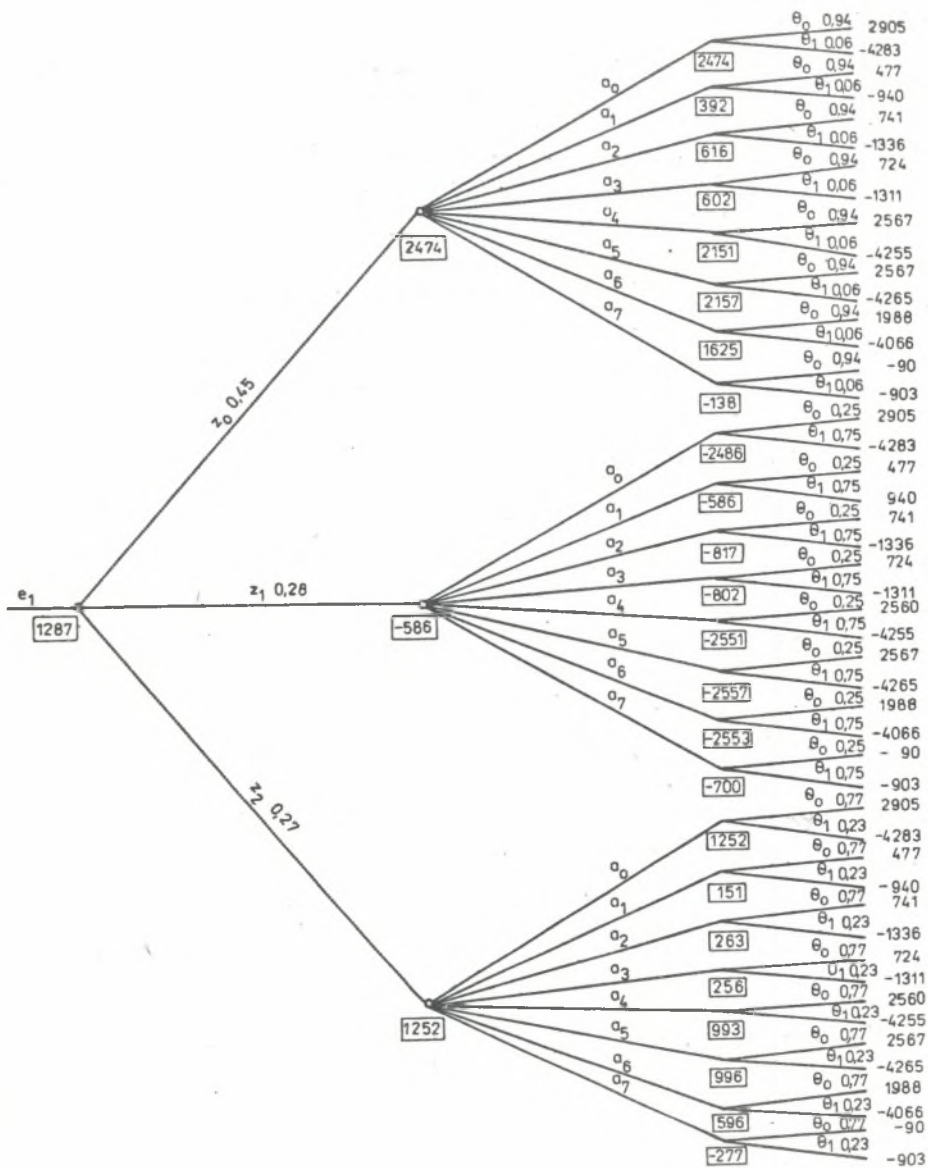
Wartość oczekiwana związana z wyborem doświadczenia  $e_1$  określono wyrażając najpierw optymalne korzyści  $u(e_1, z)$  przez prawdopodobieństwo tego, że wynikiem eksperymentu będzie  $z$  i następnie obliczono odpowiednią sumę. Prawdopodobieństwo to jest równe

$$\begin{aligned} P(z_0/e_1) &= P(z_0/e_1, \theta_0) P'(\theta_0) + P(z_0/e_1, \theta_1) P'(\theta_1) = \\ &= 0,6 \cdot 0,7 + 0,1 \cdot 0,3 = 0,45, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(z_1/e_1) &= P(z_1/e_1, \theta_0) P'(\theta_0) + P(z_1/e_1, \theta_1) P'(\theta_1) = \\ &= 0,1 \cdot 0,7 + 0,7 \cdot 0,3 = 0,28, \end{aligned}$$

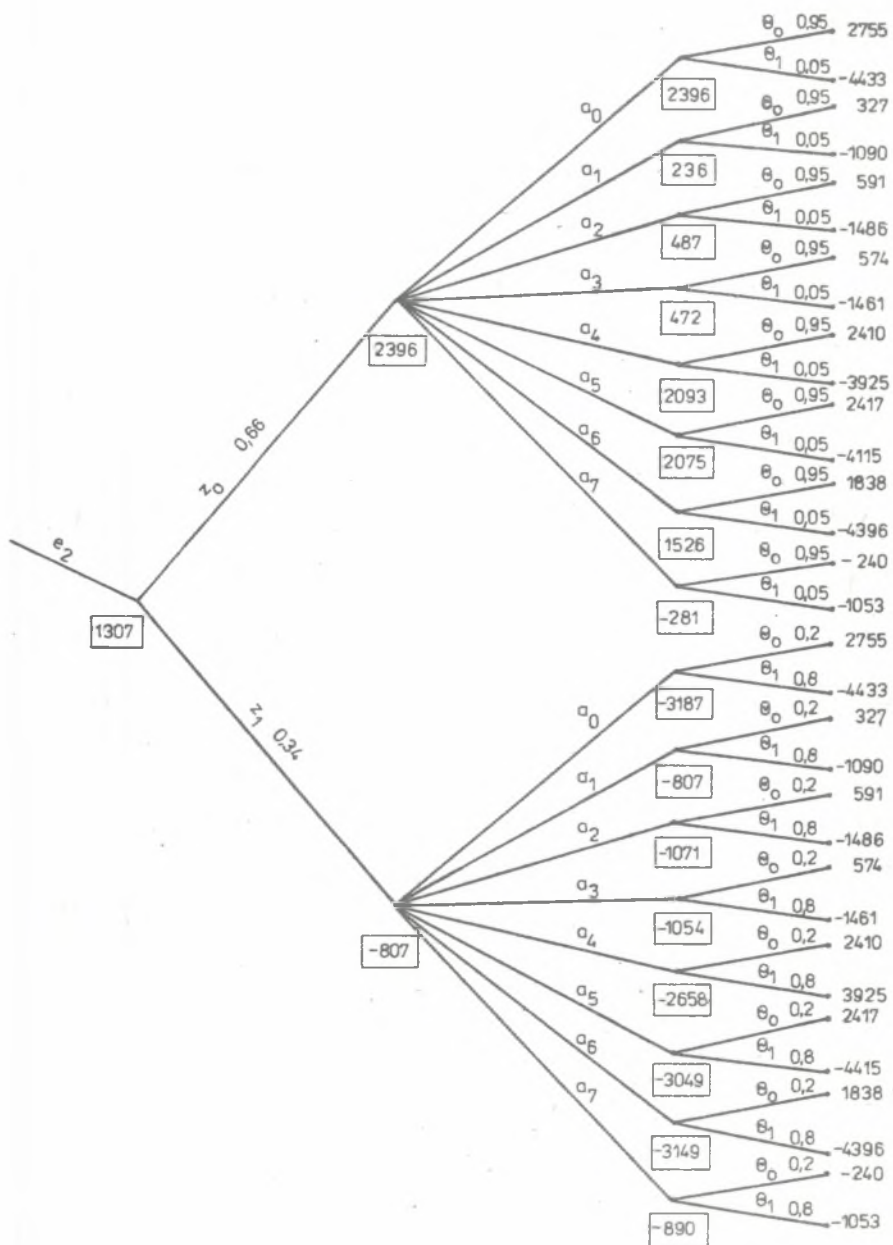
$$\begin{aligned} P(z_2/e_1) &= P(z_2/e_1, \theta_0) P'(\theta_0) + P(z_2/e_1, \theta_1) P'(\theta_1) = \\ &= 0,3 \cdot 0,7 + 0,2 \cdot 0,3 = 0,27. \end{aligned}$$





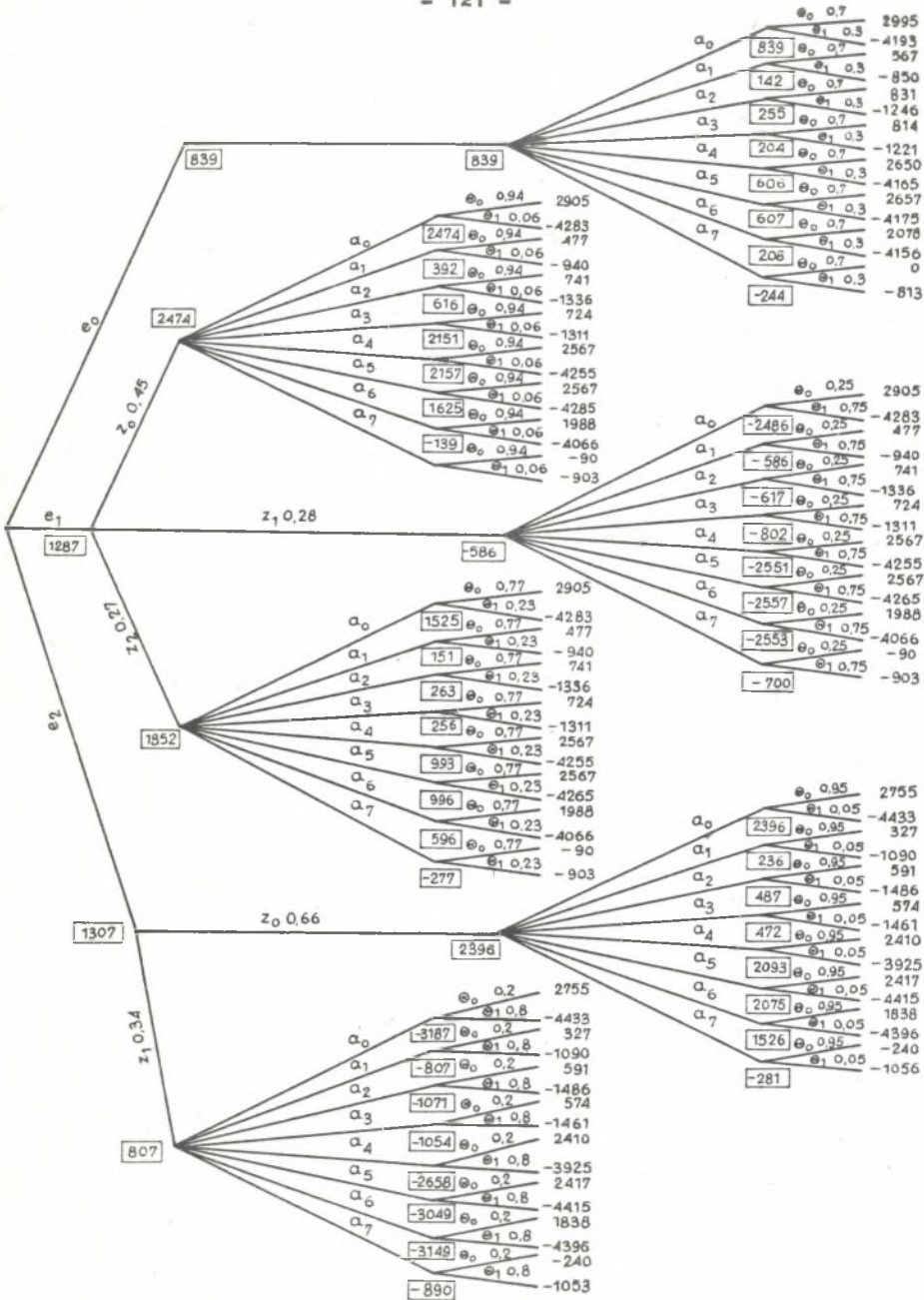
Rys. 29. Drzewo decyzyjne wyboru sposobu obróbki ze względu na doświadczenie  $e_1$  - pomiar parametru  $R_a$

Fig. 29. Decision tree for selection of treatment method on the ground of experiment  $e_1$  - measurement of parameter  $R_a$



Rys. 30. Drzewo decyzyjne wyboru sposobu obróbki ze względu na doświadczenie  $e_2$  - pomiar naprężeń  $\sigma_w$

Fig. 30. Decision tree for selection of treatment method on the ground of experiment  $e_2$  - measurement of stresses  $\sigma_w$



Rys. 31. Drzewo decyzyjne wyboru sposobu obróbki powierzchniowej łopatki sprężarki z oznaczonym prawdopodobieństwem i oczekiwanyymi korzyściami

Fig. 31. Decision tree of selection of treatment method of compressor blade with indicated probability and expected advantages

Zatem oczekiwaną korzyścią  $e_1$  jest

$$E[u(e_1)] = \sum_k u^*(e_1, z_k) P(z_k/e_1), \quad (187)$$

$$E[u(e_1)] = 2474 \cdot 0,45 + (-586) 0,28 + 1252; 0,27,$$

$$E[u(e_1)] = 1287.$$

Odpowiednie drzewo decyzyjne przedstawiono na rys. 29.

Podobne obliczenia przeprowadzono dla gałęzi  $e_2$ . Jest to gałąź doświadczenia polegającego na pomiarze naprężeń własnych WW. Odpowiednie drzewo decyzyjne przedstawiono na rys. 30. Natomiast na rys. 31 przedstawiono pełne drzewo decyzyjne wyboru wszystkich omawianych sposobów obróbki.

Rezultaty przedstawionego eksperymentu wskazują na możliwości szerszego zastosowania omawianej metody w zagadnieniach technologii maszyn.

## 7. WNIOSKI

1. Zastosowanie analizy wymiarowej w budowie modeli matematycznych wpływu obróbki powierzchniowej na konstytuowaną WW pozwoliło na wyznaczenie poprawnych pod względem wymiarowym wzorów fizycznych, zawierających więcej o 3 lub 4 parametry w porównaniu do podobnych zależności opracowanych za pomocą metod teorii planowania eksperymentu. Ponadto zastosowanie w badaniach metody wyboru bazy wymiarowej umożliwiło nie tylko zwiększenie dokładności aproksymacji, ale i opracowywanie modeli o postaciach ułatwiających prowadzenie eksperymentu.

2. Opracowanie jakościowych modeli w postaci zupełnego układu liczb kryterialnych wymagało przeprowadzenia wnikliwej analizy przebiegu wszystkich poznanych procesów, związanych z tworzeniem WW podczas obróbki powierzchniowej. Ustalając sens fizyczny liczb kryterialnych można je wykorzystać dodatkowo do opisywania wpływu obróbki powierzchniowej na konstytuowaną WW. Stosowanie analizy wymiarowej ułatwi też szersze prowadzenie badań modelowych wpływu procesu technologicznego na niezawodność elementów maszyn.

W świetle wykazanych zalet można uznać, że postawiona teza o celowości zastosowania analizy wymiarowej w budowie modeli matematycznych wpływu parametrów obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe WW została udowodniona.

3. Z rozważań teoretycznych i badań własnych wynika silny związek wytrzymałości zmęczeniowej i zużycia korozyjnego z trwałością i niezawodnością elementów maszyn. O wzroście niezawodności elementów decyduje średnia wartość wytrzymałości, jej odchylenie standardowe oraz w największym stopniu spadek wytrzymałości, spowodowany głównie przez zużycie korozyjne (tabl. 8). Wskazuje to na kierunki prowadzenia badań w zakresie poprawy niezawodności metodami technologicznymi i na fakt, że konstytuowanie badań tylko w aspekcie poprawy trwałości nie prowadzi jednoznacznie do podwyższenia niezawodności elementów, ponieważ w zależnościach na trwałość nie występuje odchylenie standardowe.

4. Przedstawione modele matematyczne do wyznaczania trwałości i niezawodności elementów cechują się prostą budową, umożliwiając wyznaczenie niezawodności początkowej elementu i uwzględnienia jego procesu starzenia, a więc są wygodne do stosowania w praktyce.

5. Wyniki badań wpływu wybranych sposobów obróbki powierzchniowej na odporność na korozję wżerową i naprężeniową materiału EJ 736 wykazały duże możliwości poprawy odporności na zużycie korozyjne elementów przy zastosowaniu metod technologicznych. Celowe jest więc rozszerzenie podobnych badań w odniesieniu do większej liczby materiałów i innych rodzajów korozji.

6. Rezultaty badań eksperymentalnych sugerują, że stosowanie bayesowskiej teorii decyzji może być najodpowiedniejsze w wstępnej fazie wyboru procesu technologicznego. Metoda ta w znacznym stopniu może przyczynić się do skrócenia czasu opracowania tego etapu, przy uwzględnieniu jednocześnie aspektów ekonomicznych, technicznych i jakościowych elementów. Ważne jest to szczególnie w uruchamianiu nowej produkcji. Zalety wynikające z zastosowania omawianej metody w technologii maszyn oraz wykazanie istotnego wpływu wytrzymałości zmęczeniowej i zużycia korozyjnego na trwałość i niezawodność elementów maszyn udowadniają dalsze tezy pracy.

7. Wyniki rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych sugerują możliwości ustalania wskaźników pośrednich spośród parametrów WW do określania trwałości i niezawodności elementów. Może to w znacznym stopniu uprościć ocenę niezawodności elementów, szczególnie w warunkach produkcyjnych.

8. Przedstawione zależności wpływu naprężeń własnych WW oraz cech materiałowych i wytrzymałościowych elementu na prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych wskazują na celowość uwzględnienia mechaniki pęknięcia w prognozowaniu trwałości i niezawodności maszyn metodami technologicznymi.

9. Wyniki badań wykazały istnienie znacznego wpływu na tworzoną WW zmieniającej się w czasie charakterystyki kulkowania strumieniowego kulkami szklanymi. Sugeruje to celowość uwzględniania tego faktu w kompleksowych badaniach związanych z konstytuowaniem WW w procesach wytwarzania elementów.

10. Otrzymane wyniki badań mogą przyczynić się do ukierunkowania teoretyczno-eksperymentalnych poszukiwań rozwiązania problemu kształtowania trwałości i niezawodności elementów maszyn w procesach technologicznych.

## LITERATURA

- [1] Albiński K.: Metody i środki obróbki erozyjnej. Prace Instytutu Obróbki Skrawaniem. Seria: Sprawozdania, Kraków 1963.
- [2] Aleksiejenko M. F. i in.: Wlijanije | tiempeieratury otpuska, miechaniczeskoj obrabotki i priłożennyh napriazhenij na czuwstvitel'nost stali 1X12H2BMFA k korrozionnomu rastrieskiwaniju. "Fizyko-chimiczeskaja Miechanika Materialów" 1969, t. 5, nr 4.
- [3] Dabiej Ju. I., Sopruniuk N. G.: Zaszczita stali ot korrozionogo miechaniczeskogo razruszenija. Technika Kijew, 1981.
- [4] Babiej Ju. I. i in.: Wlijanije frikcyonno-uproczniajuszczej obrabotki na małocyklowuju korrozionnuju ustalość stali 65G pri zostkom nagruženii". Fizyko-chimiczeskaja Miechanika Matieriałów" 1978, t. 14, nr 5.
- [5] Barlow R. E., Prosohan F.: Mathematical Theory of Reliability, Willey New York - London - Sydney 1965.
- [6] Barowicz J., Bucior J., Krauss A.: Obróbka wykańczająca kulkami szklanymi? "Przegląd Mechaniczny" 1977, nr 9.
- [7] Barowicz J., Bucior J.: Jakość wyrobów po obróbce nagniataniem kulkami szklanymi. Materiały Narady Naukowo-Technicznej nt. "Postęp w dziedzinie rozwoju obróbki nagniataniem". SIMP, Częstochowa 1978.
- [8] Barowicz J., Bucior J.: Kryteria stosowania procesu obróbki kulkami szklanymi i metalowymi oraz jego wpływ na niektóre własności użytkowe elementów lotniczych. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Technologia przepływowych maszyn wirnikowych". SIMP, Rzeszów 1978.
- [9] Baxa M. S., Chang Y. A., Burek L. H.: Effects of Sodium Chloride and Shot Peening on Corrosion Fatigue of AISI6150 Steel. Mat. Trans. 1978, A9, nr 8.
- [10] Benjamin J. R., Cornell C. A.: Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. WNT, Warszawa 1977.
- [11] Brydak J., Nowak Z.: Metoda wyboru adekwatnej bazy wymiarowej. "Czasopismo Techniczne" 1975, z. 2M.
- [12] Buch A.: Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej. PWN, Warszawa 1964.
- [13] Bucior J.: Technologiczne możliwości poprawy niezawodności łopatek silnika turbospalinowego. "Magazyn Technologa Przemysłu Lotniczego i Silnikowego" 1976, nr 9.
- [14] Bucior J.: Kształtowanie trwałości i niezawodności wyrobów w procesach ściernej obróbki wykańczającej. Zbiór prac z posiedzenia Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, Rzeszów 1977.
- [15] Bucior J.: Optymalizacja technologii obróbki wykańczającej dla podwyższenia trwałości i niezawodności łopatek silnika turbospalinowego. W: Podstawy technologii, eksploatacji i niezawodności pojazdów samochodowych. WKiŁ, Warszawa 1978.

- [16] Bucior J., Martyniuk Z., Barowicz J.: Wpływ obróbki wykańczającej na odporność na korozję naprężeniową stali 1H18N9 i stopu PA9. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Trwałość i niezawodność wyrobów przemysłu maszynowego". SIMP Rzeszów 1980.
- [17] Bucior J.: Odporność na korozję wżerową stali EUT36 po różnych sposobach obróbki wykańczającej. Materiały IV Uczelnianej Sesji Naukowo-Technicznej Wydziału Mechanicznego Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1981.
- [18] Czajewskij M. I., Szatinskij W. F.: Powyszenije rabotosposobnosti stalej w agriessiwnych sriedach pri cykliczeskom nagruženii. Naukowa Dumka, Kijew 1970.
- [19] Czacot O., Dwiliński L., Żernicki M.: Wybrane problemy skracania czasu badań niezawodności ciągników, maszyn i urządzeń rolniczych. Materiały na "Szkole Zimową-74" SPEM KOM.PAN, OPT, Katowice, Jaszowiec 1974.
- [20] Czernyszew W. W., Rachmarowa M. S., Diejcz G. B.: Protiagiwanie i uproczeniienie chwostowikow łopatok gazoturbiniwnych dwigatielej. Maszynostrojenije, Moskwa 1971.
- [21] Dąbrowa M., Zybura-Skrabalak M.: Wpływ materiału przedmiotu obrabianego na proces rozstwarzania elektrochemicznego. "Mechanik" 1978, nr 1.
- [22] Dąbrowski L., Kozak J., Perończyk J.: Dokładność i mikrogeometria powierzchni obrabianych elektrochemicznie (ECM). Materiały IV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Postępy w teorii i technice obróbki materiałów". Kraków 1973.
- [23] Dederichs M.: Untersuchung der Wärmebeeinflussung des Werkstückes beim Flachs Schleifen. Dissertation TH Aachen, 1972.
- [24] Dwiliński L., Smalko Z., Szumniak J.: Inżynieria materiałowa w problematyce niezawodności maszyn. PWN, Warszawa 1976.
- [25] Dybiec Cz.: Metody podwyższania trwałości części maszyn. WSI i TMP, Warszawa 1968.
- [26] Fidelis E., Korzan B., Kulesza R., Wiśniewski K.: Niezawodność. Terminy i określenia. WN, Warszawa 1972.
- [27] Filip R., Tota J.: Badania własności warstwy wierzchniej w stalach szybko tnących po szlifowaniu. Materiały IV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Postępy w teorii i technice obróbki materiałów". JOS, SPIT.KBM PAN, Kraków 1973.
- [28] Fubry Ch. W.: Theorie und Verfahren von Glasperlenstrahlfeinbearbeitung. "Maschinenmarkt 1966, nr 72/89.
- [29] Gadaj P., Gałkowska E., Kaczmarek J., Oliferuk W.: Wpływ stanu warstwy wierzchniej na wielkość energii zmagazynowanej. Materiały IV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej". OBiK TWWP, Polit. Pozn. Górzów Wielkopolski - Lubniewice 1981.
- [30] Gadaj P., Handzel-Powierża Z., Ziemia S., Żukowski S.: Rola warstwy wierzchniej w procesie odkształceń i dekohezji. Materiały IV Sympozjum Tribologicznego. SPEM KBM PAN, Polit. Częst. Złoty Potok 1974.
- [31] Gniadenko W. W., Bielajew J. K., Sołowiew A. D.: Metody matematyczne w teorii niezawodności. PWNT, Warszawa 1968.
- [32] Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej WNT, Warszawa 1983.
- [33] Handzel-Powierża Z.: Wpływ własności warstwy wierzchniej na zużycie i trwałość zmęczeniową. Materiały Sympozjum "Technologia a niezawodność", KN-PM PAN Kraków, Janowice 1981.
- [34] Haviland R.P.: Niezawodność urządzeń technicznych PWN, Warszawa 1968.
- [35] Hebda M., Janicki D.: Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji. WKiŁ, Warszawa 1977.



- [36] Isajev A. J., Silin S. S.: Metodika rascziota tiemperatur pri szlifowaniu. "Wiestnik Maszynostrojenija" 1967, nr 5.
- [37] Iwaniec W. I., Kraszeninnikowa I. M.: Wlijanije obkatki na malocyklowuju korrozionnuju ustalość srednieuglerodistoj i legirowannoj stali. "Fiziko- chemiczeskaja Miechanika Materialow" 1976, t. 12, nr 5.
- [38] Iwaniec W. I., Wygowskij I. L., Babiej Ju. I.: Malocyklowaja korrozionnaja ustalość stali posle wyglażywajuszozej obrabotki, "Fiziko- chemiczeskaja Miechanika Materialow" 1976, t. 12, nr 2.
- [39] Iwaniec W. I.: Wlijanije wida szlifowanija i absolutnych razmiarow dietalej na korrozionno-ustalośćnuju proczność stali. "Fiziko-chemiczeskaja Miechanika Materialow" 1975, t. 11, nr 5.
- [40] Jachowskij A. W.: Ekspierimentalnoje opriedielienije tiemperatury tonkostiennych szlifujemych dietalej. "Stanki i instrument" 1969, nr 6.
- [41] Jakimowa A. W., Grigorian G. D., Usow A. W.: Usłowija wozniknowienija szlifowocznych trieszczin i puti ich ustranienija. "Wiestnik Maszynostrojenija" 1980, nr 11.
- [42] Jaszczericyn P. I., Cokur A. K., Jeremienko M. L.: Tiepłowyje jawlenija pri szlifowanii i swojstwa obrabotannyh powierchnostiej. Nauka i Tiechnika, Mińsk 1973.
- [43] Jaszczericyn P. J.: Powyszenije eksploatacyonnych swojstw szlifowan-nych powierchnostiej. Nauka i Tiechnika, Mińsk 1966.
- [44] Jaszczericyn P. I., Popow S. A., Najerman M. S.: Progressiwnaja tiechnologija finisznoj obrabotki dietalej. Biełarus, Mińsk 1978.
- [45] Jelizawietin M. A.: Powyszenije nadiożności maszyn. Maszynostrojenije, Moskwa 1973.
- [46] Jeremienko M. L.: Wlijanije kinematiczeskogo processa szlifowanija na bałans tiepla w zonie riezanija. Progressiwnaja technologija maszynostrojenija, Mińsk 1972.
- [47] Jezierski J.: Przeciwwmęczeniowe umocnienie warstwy wierzchniej po obróbce powierchniowej zgniotem na zimno. "Archiwum Budowy Maszyn" 1971, t. XVIII, 2.
- [48] Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej ścierniej i erozyjnej. WNT, Warszawa 1971.
- [49] Kaczmarek J. Sikora J., Czyżewicz Cz.: Obórbka strumieniowo-ścierna WNT, Warszawa 1963.
- [50] Kaczmarek J.: Optymalizacja skrawania - nowy etap jego rozwoju. Materiały Ogólnokrajowej Konferencji Naukowo-Technicznej "Optimos 78". SPT KBM PAN, Polit. Krak., Kraków 1978.
- [51] Kaczmarek J.: Eigenschaften der Oberflächenschicht und deren Abhängigkeit von der Bearbeitungsart. CIRP Annalen 1963, z. 3.
- [52] Karpienko G.W.: Wlijanije sriedy na proczność i idolożiwieczność mietalów. Naukowaja Dumka, Kijew 1976.
- [53] Karpiński T., Kacalak W., Plichta St., Plichta J.: Współzależność wybranych parametrów topografii roboczej powierchni ściernicy i naprężeń ostatecznych w warstwie wierzchniej przedmiotu. Materiały Ogólnokrajowej Konferencji Naukowo-Technicznej "Optimos 78". SPT KBM PAN, Polit. Krak., Kraków 1978.
- [54] Kasprzak W., Lysik B.: Analiza wymiarowa w projektowaniu eksperymentu. PAN, Wrocław 1978.
- [55] Keller Cz.: Wpływ metod i warunków obróbki ścierniej wykańczającej naprężenia własne w warstwie wierzchniej materiałów narzędziowych. "Mechanik" 1963, nr 3.

- [56] Kiliński A.: Przemysłowe procesy realizacji. Podstawy teorii. WNT, Warszawa 1976.
- [57] Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali. WNT, Warszawa 1985.
- [58] Kokar M.: Ustalenie postaci modelu matematycznego z wykorzystaniem analizy wymiarowej. "Inżynieria Chemiczna" 1975, v. 1.103.
- [59] Kolman R.: Mechaniczne wzmocnianie powierzchni części maszyn. WNT, Warszawa 1965.
- [60] König W., Lortz W.: Einfluss des Abrichtwerkzeuges und der Abrichtbedingungen auf die Schleifscheibentopographie und das Arbeitsergebnis. Ind. Anz. 1976, 98, nr 14.
- [61] Koziański A., Urbaniak M.: Wpływ intensyfikacji wybranych parametrów szlifowania na naprężenia wynikowe warstwy wierzchniej. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Technologia obróbki ścierniej" SIMP, Polit. Rzesz. Rzeszów 1974.
- [62] Krawczenko B. A. i dr.: Pówyższenije wynosliwosti i nadiożnosti dietalej maszyn i mehanizmow. Kujbyszewskoje Knižnoje Izdatielstwo, Kujbyszew 1966.
- [63] Kriemien E. I., Miedwiediew W. W.: Kaczestwo powierchnostnogo sioja miettała pri obrabotkie abraziwnymi bruskami. "Wiestnik Maszynostrojenija" 1973, nr 6.
- [64] Kudriawcew I. W.: Sowriemiennoje sostojanije i praktičeskoje priimienije PPD. "Wiestnik Maszynostrojenija" 1972, nr 1.
- [65] Kurafuri H.: Development of Researches and Applications on Spark Erosion in Japan. 14 CIRP General Assembly 1964.
- [66] Lindgren B. W.: Elementy teorii decyzji. WNT, Warszawa 1977.
- [67] Łabęcki J., Skrzypiński A.: Udział naprężeń własnych w zarodkowaniu i rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Materiały IV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej". OBiK TWWP Gorzów Wlkp. Polit. Pozn. Gorzów Wielkopolski - Lubniewice 1981.
- [68] Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1976.
- [69] Marciniak M.: Prognozowanie niezawodności części maszyn w oparciu o model probabilistyczny warstwy wierzchniej. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. "Trwałość i niezawodność wyrobów przemysłu maszynowego. SIMP, Polit. Rzesz. Rzeszów 1980.
- [70] Matalin A. A.: Technologiczeskije metody powyszenija dołgowiecznosti dietalej maszyn. Technika, Kijew 1971.
- [71] Matteson J. A.: Glass Bead Shotpeening Improves Life of Tools. "Machinery" 1969, nr 10.
- [72] Milo J. H.: Prevention of Stress Corrosion by Shot Peening, Nace 1968 Conference, Cleveland, Ohio USA.
- [73] Moroz I. I.: Elektrochimizieskije metody obrabotki. "Stanki i instrument" 1967, nr 9.
- [74] Murzewski J.: Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych. WNT, Warszawa 1970.
- [75] Niezgodziński M. E. Niezgodziński T.: Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn. PWN, Warszawa 1973.
- [76] Nowak Z. i in.: Zastosowanie wzorów Cramera w analizie wymiarowej. "Czasopismo Techniczne" 1969, z. 8M.
- [77] Nowak Z.: Ogólna metoda wyznaczania zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych. "Czasopismo Techniczne" 1969, z. 6M.
- [78] Niemanow M. S.: Effiektiwnost PPD w powyszenii korrozionno-ustalożstnoj procznosti dietalej. Wiestnik Maszynostrojenija" 1972, nr 1.

- [79] Oczósz K., Porzycki J.: Szlifowanie - podstawy i technika WNT, Warszawa 1986.
- [80] Opitz H., Heitmann H., Becker-Barbrock U.: Grundlagen und Anwendung der elektrochemischen Bearbeitungsverfahren, Annals of the CIRP, vol. XV, 1967.
- [81] Oprzędkiewicz J.: Niezawodność maszyn. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1981.
- [82] Orłoś Z.: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń PWN, Warszawa 1977.
- [83] Osyczka A.: Przegląd metod optymalizacji wielokryterialnej. Materiały Ogólnokrajowej Konferencji Naukowo-Technicznej "Optimos 78" SPT KBM PAN, Polit. Krak. Kraków 1978.
- [84] Pająk E., Wieczorowski K.: Podstawy optymalizacji operacji technologicznych w przykładach. Warszawa - Poznań 1982.
- [85] Pakosiewicz B.: Badania wpływu warunków skrawania przy toczeniu na stan warstwy wierzchniej i jej niektóre parametry użytkowe. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1972.
- [86] Papszew D.D. i dr.: Powyszenie ustaloštnoj proczności diatalej iz titanowego spława gidrodobiestrujnoj obrabotkoj i wibrogaitowkoj. "Wiastnik Maszynostrojienija" 1977, nr 4.
- [87] Pilecki Sz., Ziemba S.: Mechanizm powstawania odkształceń i dekohezji przy obciążeniach dynamicznych. Materiały IV Sympozjum Tribologicznego, Złoty Potok 1974.
- [88] Podurajew W. N., Kałamow W. S.: Fiziko-chimiczeskije metody obrabotki. Maszynostrojienije, Moskwa 1973.
- [89] Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
- [90] Polański Z.: Badania warstwy wierzchniej wybranych materiałów stosowanych na narzędzia do obróbki plastycznej na zimno, kształtowane za pomocą drażenia elektroiskrowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Kraków 1968, nr 8.
- [91] Potters Industries Inc.: Effect of Glass Bead Peening in Retarding Stress Corrosion. Carlstadt, New Jersey 1974.
- [92] Praca zbiorowa. Zmęczenie metali. WNT, Warszawa 1962.
- [93] Proczność pri nieustanowiwszychsia rieżymach pieriemiennych naprieżeniej. AN SSSR, Moskwa 1954.
- [94] Pronikow A. S. i dr.: Technologiczeskaja nadiożność stankow Maszynostrojienije, Moskwa 1971.
- [95] Przybylski W.: Obróbka nagniataniem, technologia i oprzyrządowanie. WNT, Warszawa 1979.
- [96] Romanow W. W.: Wlijanije korrozionnoj sriedy na cykliczeskiju proczność mietalłow. Nauka, Moskwa 1969.
- [97] Ryżow M. A., Ryżwo M. N.: Wlijanije sposobow zuboszlifowanija na kaczeštwo powierchnostnogo šioja zubow kalios. Nadiożność i kaczeštwo zubczatych pieriedacz. Moskwa 1969.
- [98] Sadowski W.: Decyzje i prognozy. PWE, Warszawa 1981.
- [99] Siedow L. J.: Analiza wymiarowa i teoria prawdopodobieństwa w mechanice. WNT, Warszawa 1968.
- [100] Sieriensien S.W.: Soprotiwlenije materialłow ustaloštnomu i chrupkomu razruszeniju. Amomizdat, Moskwa 1975.
- [101] Skanley R. F.: A proposed Mechanism of Fatigue Failure. Proc. Colloquy on Fatigue Stockholm 1955, Springer Verlag, Berlin 1956.
- [102] Smolencew W. P. i dr.: Ustaloštanja proczności materialłow posle elektrochimiczeskoj obrabotki. "Stanki i Instrument" 1973, nr 5.

- [103] Solski P.: O niektórych własnościach zgniezionej warstwy podpowierzchniowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1962, nr 9.
- [104] Sołowiew A. D.: Analityczne metody w teorii niezawodności. WNT, Warszawa 1983.
- [105] Sotskow B. S.: Niezawodność elementów i urządzeń automatyki. WNT, Warszawa 1973.
- [106] Szklarska-Smiałkowska Z.: Prace podstawowe z zakresu korozji i ochrony metali wykonywane w Polsce. "Ochrona przed Korozją" 1974, nr 9.
- [107] Szács E.: Modelowanie matematyczne w fizyce i technice. WNT, Warszawa 1977.
- [108] Szulc S., Stefko A.: Obróbka powierzchniowa części maszyn - podstawy fizyczne i wpływ na własności użytkowe. WNT, Warszawa 1976.
- [109] Tendaj B.: Zawartość ferrytu i węgla a odporność na korozję naprężeniową stali i stopów o austenitycznej osnowie. "Ochrona przed Korozją" 1973, nr 1.
- [110] Timoszenko B. I., Nazariw W. S., Jermolenko D. Z.: Proczność i iznosostojkost diatalej maszyn pri elektrozozionnoj obrabotkie. "Wiestnik Maszynostrojenija" 1974, nr 4.
- [111] Tomaszek H.: Model zużycia objętościowego elementu o obciążeniu impulsowym. "Zagadnienia Eksploatacji Maszyn" 1979, nr 2/38.
- [112] Tomaszek H.: Ocena zużycia objętościowego pod wpływem wymuszenia w postaci losowo pojawiających się impulsów. "Zagadnienia Eksploatacji Maszyn" 1981, nr 1/45/.
- [113] Tkaczew W. N., Finsztiejn B. M., Własienko W. F. i dr.: Metody powyszenija dołgowiecznosti maszyn. Maszynostrojenije, Moskwa 1971.
- [114] Vogel Z., Barski T.: Wybór optymalnych warunków szlifowania ze względu na wielkość naprężeń w warstwie wierzchniej. Materiały Ogólnokrajowej Konferencji Naukowo-Technicznej "Optimos 78". SPT KBM PAN, Polit. Krak., Kraków 1978.
- [115] Volk W.: Statystyka stosowania dla inżynierów. PWT, Warszawa 1965.
- [116] Warszyński M., Jasica G.: Metody prognozowania niezawodności w etapie projektowania urządzeń technicznych. Materiały "VII Szkoły Niezawodności". TNOiK Odd. Bydgoszcz, Kołobrzeg 1983.
- [117] Weiss Z.: Model procesu szlifowania w aspekcie zastosowania sterowania adaptacyjnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Poznań 1979, nr 77.
- [118] Werner G.: Konzept und technolgische Grundlagen zur adaptiven Prozesoptimierung. Habilitationschrift TH Aachen, 1973.
- [119] Wieroman W. Ju.: K woprosu wlijanija sostojanija powierchnostiej posle obrabotki elektrofizikochimiczeskoj metodami na powyszenije procznosti izdielij. Międzynarodowe Sympozjum ISEM-6, Kraków 1980.
- [120] Wnuk M. P.: Podstawy mechaniki pękania. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1977.
- [121] Wojnarowski J.: Grafy i liczby strukturalne jako modele układów mechanicznych. Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej, Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej Oddział w Gliwicach, Gliwice 1977, nr 38.
- [122] Zachwieja T.: Badania niektórych cech i własności użytkowych warstwy wierzchniej po obróbce elektrochemicznej. Międzynarodowe Kolokwium: "Erozyjne metody obróbki metali. Kraków 1968.
- [123] Ziemba S. (red. nauk.): Fizyczne aspekty trwałości i niezawodności obiektów technicznych. [PWN] Warszawa 1976.
- [124] Żebrowski H.: Metody i urządzenia pomiarowe i sterujące w eksperymentalnych badaniach procesu gładzenia otworów. Materiały konferencji nt. "Nowoczesne metody planowania i realizacji eksperymentów oraz opracowywania ich wyników" Polit. Rzesz, Rzeszów 1976.

## KSZTAŁTOWANIE TRWAŁOŚCI I NIEZAWODNOŚCI WYBRANYCH ELEMENTÓW MASZYN W PROCESACH OBRÓBKI POWIERZCHNIOWEJ

### S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono wybrane problemy kształtowania trwałości i niezawodności elementów maszyn w procesach obróbki powierzchniowej. Za najistotniejszy zespół cech mających wpływ na trwałość i niezawodność elementów uznano stan i właściwości użytkowe warstwy wierzchniej. Stąd też podjęto próby opracowania modeli matematycznych wpływu warunków szlifowania, gładzenia, polerowania, obróbki strumieniowo-ściernej, nagniatania statycznego i dynamicznego oraz obróbki elektroerozyjnej i elektrochemicznej na stan i właściwości użytkowe warstwy wierzchniej oraz na trwałość i niezawodność elementów maszyn z zastosowaniem analizy wymiarowej. Szczegółowo przedstawiono tu zależności wpływu warstwy wierzchniej na trwałość i niezawodność elementów.

Opracowania teoretyczne zweryfikowano eksperymentalnymi badaniami własnymi. Przedstawiono w nich wpływ wybranych sposobów obróbki powierzchniowej na stan i właściwości użytkowe warstwy wierzchniej, na korozję wżerową i naprężeniową oraz wpływ właściwości użytkowych warstwy powierzchniowej na trwałość i niezawodność elementów. Zaprezentowano również przykład wyboru obróbki powierzchniowej łopatek silnika lotniczego za pomocą bayesowskiej teorii decyzji celem optymalnego ukształtowania ich niezawodności.

Pracę zakończono wnioskami i obszernym zestawem literatury.

ФОРМИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ  
ИЗБРАННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ПРОЦЕССЕ  
ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Р е з ю м е

В работе указаны избранные вопросы формирования долговечности и надёжности деталей машины в процессе поверхностной обработки. В связи с обширностью проблемы проведены исследования деталей работающих в условиях усталости на-грузок и коррозионного износа.

Самым существенным комплексом свойств влияющих на долговечность и надёжность деталей считаются состояние и эксплуатационные качества поверхностного слоя. В работе предпринята попытка обработки математических моделей влияния условия шлифования, глажения, полирования, абразивно-струйной обработки, статического и динамического поверхностного наклёпа и электроэрозионной и электрохимической обработки на состояние и эксплуатационные качества поверхностного слоя, а также на долговечность и надёжность деталей машины с использованием размерного анализа. Подробно представлены зависимости влияния поверхностного слоя на долговечность и надёжность деталей.

Теоретические разработки проверены на собственных экспериментальных испытаниях. Представлены в них влияние избранных способов поверхностной обработки на состояние и эксплуатационные качества поверхностного слоя, на сквозную коррозию и коррозию напряжённого материала, а также влияние эксплуатационных качеств поверхностного слоя на долговечность и надёжность деталей. Указан тоже пример выбора поверхностной обработки лопаток авиационного двигателя для оптимального формирования их надёжности с помощью байесовской теории решений.

Работа завершена заключениями и обширной библиографией.

SHAPING OF DURABILITY AND RELIABILITY  
OF SELECTED MACHINE ELEMENTS  
IN SURFACE TREATMENT PROCESSES

S u m m a r y

In this work, some selected problems of durability and reliability control in machine elements during finishing processes have been presented. Because of ampleness of the problem, the research work has been limited to elements operating in fatigue load and corrosion wear conditions.

As the most significant complex of features having an effect on durability and reliability, the state and usable properties of the surface layer have been assumed. Hence, some attempts have been made to work out mathematical models of an effect of grinding, smoothing, polishing, abrasive-blast treatment, static and dynamic burnishing, as well as EDM and ECM on the state and usable properties of the surface layer, and on durability and reliability of machine elements using the dimensional analysis. Particularly, a detailed description of an effect of the surface layer on durability and reliability of elements has been given.

The theory has been verified in the author's own experimental works. In the experiments, an effect of some selected finishing processes on the state and usable properties of the surface layer, and on stress and pitting corrosion, as well as an effect of the surface layer usable properties on durability and reliability of elements have been investigated. An example of selection of a finishing process of aircraft turbine engine blades by means of Bayes' decision theory has been presented in order to achieve the optimum reliability of the blades.

The work has been ended with conclusions and extensive list of references.





**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ  
MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

- 44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b  
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a  
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33  
40-095 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12  
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10  
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22  
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2  
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1  
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1  
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7  
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288  
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN —  
Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.