

И.А. ИВАНОВ,
С.А. ВЕЖЕНАРОВ,
А.Г. ЗАБОЛОТНЕВ
Р. БОНК,
Б. МРУВЧЫНСКА,
М. СИТАЖ

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫНОСАВОСТИ ЦЕЛЬНОКАТАЛНЫХ КОАЕС

Резюме. Рост эксплуатационных скоростей подвижного состава железных дорог требует повышения надежности колес, использования технологических процессов более высокого уровня, чем применявшиеся ранее и обеспечивающие удовлетворительное качество. Для оценки существующего уровня технологического обеспечения были проведены экспериментальные исследования величины остаточных напряжений, шероховатости и наклона поверхности диска, обода и ступицы колеса после различных этапов технологического процесса их изготовления.

METODYKA I REZULTATY BADAŃ ZMĘCZONYCH KÓŁ KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono problemy dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej tarczy kół kolejowych zestawów kołowych.

Jedna z metod zwiększenia ich trwałości, którą omówiono w opracowaniu, jest metoda optymalizacji wybranych parametrów technologicznych procesu ich wytwarzania.

Zmiana takich parametrów technologicznych, jak: naprężenia własne, chropowatość powierzchni i umocnienie warstwy wierzchniej dało możliwość zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej tarczy kół kolejowych o 25-30%

THE GENERAL METHOD AND RESEARCH INCREASING OF MONOBLOCK WHEEL'S FAITGUE SAFETY

Summary. The paper describes the general method and research of increasing the monoblock wheel's fatigue safety.

The method of study and wheel functionig quality control on base of systematic approach are offered. According to theory and experiments there have been suggestet new characteristics of whell. White using then at the slage of manufacturing, fatigue safety of monoblock wheels increases upon 25-30%.

На железных дорогах в процессе эксплуатации отмечаются отдельные случаи появления трещин и изломов диска цельнокатанных колес, имевших усталостный характер. Эти дефекты свидетельствуют о возникновении в диске напряжений, достигающих предела выносливости материала. Запас выносливости [1, 2] проверяется по формуле

$$\Pi = \sigma_{aN}/\sigma_{Nэ}$$

где σ_{aN} - предел выносливости диска при установившемся режиме нагружения и базовом числе циклов $N = 10^7$.

$\sigma_{NЭ}$ - эквивалентное значение амплитуды эксплуатационных динамических напряжений в диске.

Рост эксплуатационных скоростей подвижного состава железных дорог требует повышения надежности колес, использования технологических процессов более высокого уровня, чем применявшимся ранее и обеспечивающие удовлетворительное качество.

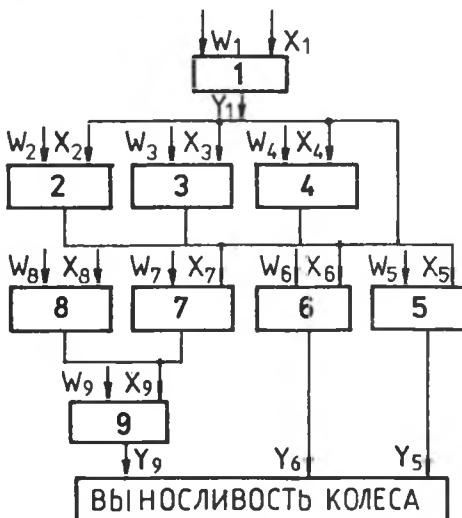
Формирование в поверхностном слое диска оптимальных параметров качества, таких как остаточные напряжения, шероховатость степень и глубина наклена позволяет повысить предел выносливости [3-5]. Управление параметрами качества поверхностного слоя диска можно производить с помощью механической обработки, используя технологические регламенты, определяющие рациональные границы параметров режима обработки и их связь с усталостной прочностью. Возможны и другие пути решения этого вопроса.

Для оценки существующего уровня технологического обеспечения были проведены экспериментальные исследования величины остаточных напряжений, шероховатости и наклона поверхности диска, обода и ступицы колеса после различных этапов технологического процесса их изготовления. Остаточные напряжения замерялись также в колесах, напрессованных на ось, и под статической нагрузкой. При измерении остаточных напряжений использовался прибор [3], работающий на основе оценки магнитной проницаемости и проводимости материала в зависимости от механических напряжений, испытываемых поверхностью детали (колеса).

Изследования показали [4, 5, 6], что существующая в настоящее время технология изготовления цельнокатанных колес способствует формированию в основном, остаточных напряжений растяжения на большей части поверхности диска. В зонах, наиболее подверженных усталостным разрушениям, имеет место значительный градиент величины напряжений на поверхности, а в некоторых случаях даже с изменением знака. В целом диск находится под воздействием остаточных напряжений растяжения величиной 25 Н/мм².

Шероховатость по параметру Rz необработанной поверхности диска колес в пределах 150..200 мкм, степень наклена 2-3%.

Диски колес скоростных поездов (ЭР-200), в соответствии с технологией их изготовления, подвергаются обточке по всему профилю, что приводит к ликвидации всех дефектов поверхности, таких как обезуглероженность, морщинистость, и.т.д., присущих в основном колесам с плоскоконическим диском. Однако, режимы обработки в большинстве случаев - нерациональны, выбираются лишь в соответствии с требованиями к шероховатости поверхности, без учета требований к другим показателям качества. Это приводит, в частности, к неблагоприятному распределению остаточных напряжений в диске, отрицательно сказывающемуся на пределе выносливости колес.



В процессе эксплуатации колеса остаточные напряжения суммируются с напряжениями, возникающим от рабочих нагризок. В зависимости от того, благоприятное или неблагоприятное распределение остаточных напряжений заложено при изготовлении колеса, влияние их может быть как положительным, так и отрицательным.

Принятая схема исследования использует три основных вектора. Вектор входных параметров X , вектор управляющих параметров W и вектор выходных параметров Y . В разных моделях эти векторы отличаются составом включенных параметров.

Для различных вариантов сочетаний параметров режима обработки были определены (рис. 1 - модель 1) основные параметры процесса (контактные, нагрузки, температуры, составляющие силы резания, напряжения и др.) [8].

При расчете остаточных напряжений [9] определялись напряжения от сил резания, приложенных к передней и задней поверхностям инструмента (модель 2), а также температурные остаточные напряжения (модель 3). Действие силовых полей передней и задней поверхностей инструмента различно по своему характеру, по разному зависит от условий резания. Создаваемые ими остаточные напряжения могут иметь существенно отличающиеся величину, знак и глубину залегания. Разделение действия температурного поля от передней и задней поверхностей инструмента нецелесообразно. вне зависимости от того, каким фактором оно вызвано, влияние его на напряженное состояние будет одним и тем же. Остаточные напряжения от структурных и фазовых превращений определяются по методике [8].

Общий порядок расчета силовых остаточных напряжений следующий:

1. Определяются нормальные и касательные напряжения от действия сил резания;
2. Определяются главные напряжения;
3. Проверяется условие пластичности по теории Хубера-Мизеса, то есть: пластические деформации возникают тогда, когда интенсивность напряжений достигает величины предела текучести материала при растяжении;
4. Определяются остаточные напряжения в соответствии с теоремой Генки о разгрузке:

$$\sigma_c = \sigma_{\text{фик}} - \sigma_{\text{ист}}$$

Фиктивные напряжения $\sigma_{\text{фик}}$ определялись в соответствии с предположением об идеальной упругости материала. Истинные напряжения $\sigma_{\text{ист}}$, соответствующие состоянию текучести, - из условия равенства упругих и пластических деформаций на границе их раздела.

Температурные остаточные напряжения рассчитывались в следующем порядке:

1. Определяется закономерность распределения температуры θ в поверхности диска по глубине y при его обточке:

$$\theta = C_0 \theta_A (Pe \cdot B) \frac{x_2}{a_1} \left(\frac{y+a_1}{a_1} \right) x_2 \left(\frac{\rho_1}{a_1} \right)^{x_3-d} \sin^{0,05-0,042x_4} \alpha \cdot \sin^{-0,21x_4} \gamma ,$$

где: θ_A - максимальная температура первичных пластических деформаций в условной плоскости сдвига;

$C_0, x_1, x_2, x_3, x_4, d$ - безразмерные коэффициенты [8,9];

$Pe = \frac{a_1}{a}$ - критерий Пекле, характеризующий степень влияния режимных условий процесса (V_a) по сравнению с теплофизическими (a - коэффициент температуропроводности колесной стали);

α, γ - задний и передний углы лезвия инструмента;

a_1, ρ_1 - ширина среза и радиус скругления режущей кромки;

$B = \operatorname{tg} \beta_1$ - величина, характеризующая степень пластических деформаций металла (β_1 - угол наклона условной плоскости сдвига).

2. Проверяется условие возникновения температурных остаточных напряжений $\sigma_{t\text{in}} > \sigma_t$, где $\sigma_{t\text{in}}$ - напряжения, возникающие в поверхностном слое при нагревании.

3. Проверяется условие возникновения пластических деформаций при охлаждении $\sigma_{t\text{ool}} > 2 \sigma_t$, где $\sigma_{t\text{ool}}$ - напряжения, возникающие в поверхностном слое при охлаждении.

При соблюдении этих условий определяются границы раздела упругих и пластических деформаций: $У_{CH}$ и $У_{CO}$.

4. Определяются максимальные напряжения, возникающие при охлаждении сомах

5. В зависимости от величины сомах определяются температурные остаточные напряжения $\sigma_{t\text{imp}}$ по соответствующим формулам [5].

Суммарные остаточные напряжения определялись алгебраическим суммированием температурных и силовых остаточных напряжений. Напряжения от структурно-фазовых превращений не учитывались.

При анализе шероховатости обработанной поверхности (модель 5) исходили из того, что на формирование неровностей влияют не только геометрия сечения среза, но и объем и скорость пластического деформирования металла, обусловленные комплексом температурно-силовых явлений, возникающих, в зоне резания, а также жесткостью системы станок-деталь. В общем случае, высота неровностей R_z определялась по следующей зависимости:

$$R_z = R_p + R_h + R_b + R_c$$

где R_p - теоретическая или расчётная высота неровностей,

R_h - приращение высоты неровностей в результате упругого восстановления поверхности среза,

R_b - приращение высоты неровностей из-за вибраций режущего инструмента,

R_c - приращение высоты неровностей вследствие срезания их вершин сходящей стружкой.

Глубина наклена обработанной поверхности (модель 6) определялась как глубина залегания пластической деформации, определяемая из условий равенства алгебраической суммы напряжённой (обусловленных силовым σ_{cy} и температурным σ_h воздействием инструмента на обрабатываемую поверхность) пределу текучести

$$\sigma_t = \sigma_h + \sigma_{cy}$$

Для оценки общего напряжённого состояния колеса был произведен аналитической расчёт напряжений в колёсах скоростных поездов, имеющих изношенный и неизношенный обод, для различных вариантов вертикальных и боковых нагрузок. Расчёты производились с использованием метода конечных элементов [10, 11, 12].

В цилиндрической системе координат r, z, θ производилось разбиение сечения колеса на треугольные элементы, определялись векторы узловых перемещений и вектор перемещений в любой точке элемента. Затем в соответствии с соотношениями Коши определялся вектор деформаций и составляющие тензора напряжений.

Внешние силы, приложенные к соответствующим узлам сетки разбиения, приводились к обобщенным силам в узлах на основе статической эквивалентности между ними, то есть из условия равенства работ заданных внешних сил на возможных вариациях перемещений, и узловых сил на возможных вариациях перемещений в узлах. На рис. 2 представлено распределение радиальных напряжений в сечении нового колеса при осевой нагрузке 212 кН.

Анализ результатов расчётов показал, что при вертикальной и боковой нагрузках 212 и 53 кН соответственно максимальные значения напряжений растяжения (от +40 до +60 МПа) наблюдаются в приободной и средних частях диска с наружной стороны колеса; напряжения сжатия (от -30 до -50 МПа) - в зоне перехода ступицы в диск с внутренней стороны.

Общее напряженное состояние цельнокатанного колеса определяется наложением поля напряжений, возникающих при нагружении колеса на поле остаточных напряжений, сформированное в процессе изготовления.

Анализ полученных ззоров показывает, что наиболее напряженными участками поверхностного слоя колеса являются участки диска в приободной части с наружной стороны колеса. Средняя величина растягивающих напряжений здесь составляет от +70 до +130 МПа, а в отдельных местах - до +150 МПа. В предступичной части диска напряжения снижаются до +60 МПа.

Следовательно при циклическом нагружении колеса в эксплуатации поверхностный слой диска работает в условиях знакопеременных напряжений, приободная и предступичная части диска с внутренней стороны - преимущественно в условиях напряжений сжатия, а с наружной стороны колеса действуют в основном напряжения растяжения.

Соответственно, режимы механической обработки диска должны выбираться таким образом, чтобы сформированные или напряжения в поверхностном слое компенсировали действие напряжений, вызванных внешней нагрузкой при соблюдении требований в шероковатости поверхности.

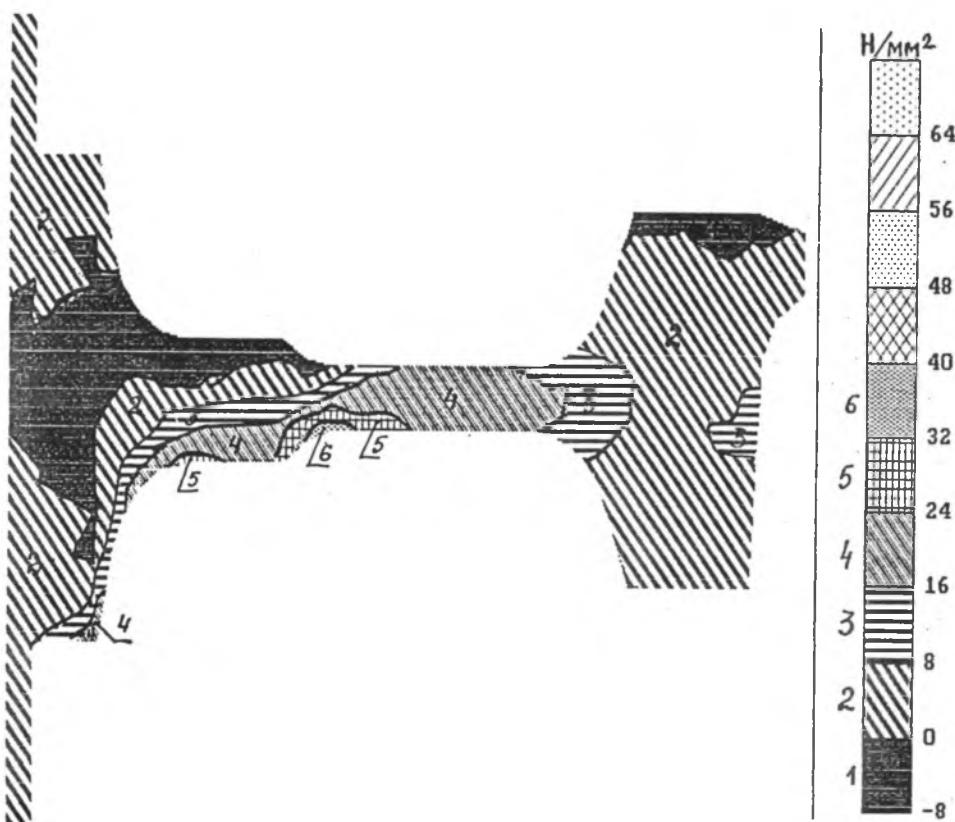
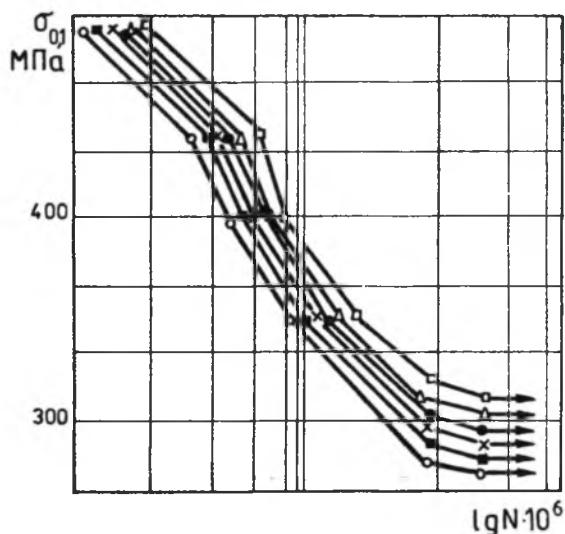


Рис. 2

Для установления связи между моделями (рис. 1) "режимы обработки - параметры качества - усталостная прочность" была выполнена оценка влияния режимов резания колесной стали на остаточные напряжения, шероховатость, а также глубину и степень наклепа в лабораторных условиях. Результаты исследования обработаны с использованием метода планирования эксперимента. Для оценки влияния параметров качества поверхности на усталостную прочность были выполнены усталостные испытания образцов из диска колеса, механически обработанных на различных режимах. Форма образцов - плоская. испытания проводились на гидравлическом пульсаторе ЦДМ-10. Коэффициент асимметрии - 0,1, базовое число циклов нагружения - $2 \cdot 10^6$. Результаты испытаний приведены на рис. 3.



○ - бост = +80 МПа, Rz60, N = 10%

■ - бост = +80 МПа, Rz40, N = 10%

□ - бост = +10 МПа, Rz20, N = 25%

● - бост = +80 МПа, Rz20, N = 10%

△ - бост = +10 МПа, Rz40, N = 10%

■ - бост = -60 МПа, Rz40, N = 15%

Рис.3

Анализ полученных кривых показывает, что наибольшее влияние на усталостную прочность образцов оказывает шероховатость поверхности, а также величина и знак остаточных напряжений. Так, при снижении шероховатости с Rz60 до Rz20, при неизменных остальных параметрах, передел выносливости возвращается с 275 МПа до 293 МПа. Усталостная прочность образцов, имевших в поверхностном слое остаточные напряжения растяжения величиной 80 МПа, составляет 285 МПа. Снижение величины остаточных напряжений до +10 МПа приводит к увеличению усталостной прочности до 303 МПа, а при формировании в поверхности образца остаточных напряжений сжатия величиной -60 МПа она достигает 310 МПа.

После математической обработки результатов экспериментальных исследований получены следующие зависимости усталостной прочности от параметров качества обработанной поверхности:

$$\sigma_{0,1} = e^{5,7 \frac{\sigma_{\text{ост}}}{0,02} - 0,015} \quad Rz^{-0,015}, \quad N^{0,02}, \quad \text{при } \sigma_{\text{ост}} > 0;$$

$$\sigma_{0,1} = e^{5,7 \frac{\sigma_{\text{ост}}}{0,02} + 0,015} \quad Rz^{-0,015}, \quad N^{0,015}, \quad \text{при } \sigma_{\text{ост}} < 0;$$

Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также оценка общего напряженного состояния колес скоростного подвижного состава позволили установить требования к уровню остаточных напряжений, шероховатости и степени наклена поверхностного слоя. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1
Требования к параметрам качества поверхностного слоя элементов диска колеса поезда ЭР-200

Участки поверхности диска		Остаточные напряжения, МПа	Шероховатость, Rz, мкм	Степень наклена, N, %
Наружная сторона колеса	Приободная часть	от -60 до -80	Rz10	10-15
	Средняя часть	от -40 до -60	Rz10, Rz40	10-15
	Предступичная часть	от -50 до -70	Rz40	10-15
Внутренняя сторона колеса	Приободная часть	от 0 до -20	Rz10	10-15
	Средняя часть	от -30 до -50	Rz10, Rz40	10-15
	Предступичная часть	от -20 до +20	Rz40	10-40

С учетом данных табл. 1, а также общих результатов зависимости "усталостная прочность - параметры качества - режимы обработки" предложены режимы различных участков поверхности диска и геометрия режущего инструмента. На этой основе разработаны операционные карты технологического процесса окончательной механической обработки диска колес поезда ЭП-200 на карусельных станках. Экспериментальная проверка показала, что использование предложенных режимов обеспечивает выполнение требований к качеству поверхностного слоя, приведенным в табл. 1. Эпюры напряжений в поверхностном слое элементов диска колес поезда ЭР-200 приведены на рис. 4.

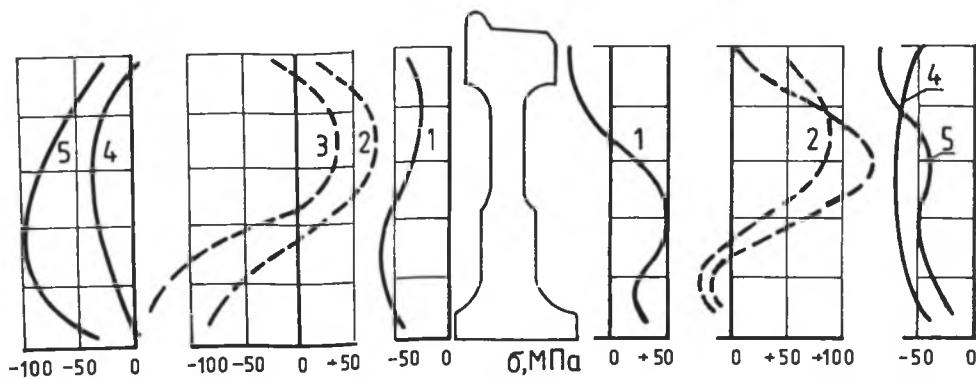


Рис. 4. 1 - от действия нагрузки; 2 и 3 остаточные и симметричные после обточки по существующей технологии; 4 и 5 остаточные и суммарные напряжения после обточки по предлагаемым режимам:

Анализ рис. 4 показывает, что суммарные напряжения в поверхностном слое (напряжения от нагрузки и остаточные) в целом соответствуют предложенным требованиям.

Аналогичный комплекс работ был выполнен для цельнокатанных колес поездов "Аврора". По его итогам разработаны рекомендации по режимам механической обработки диска, обеспечивающие требуемые величины параметров качества поверхности диска, произведена опытная механическая обработка, а затем сравнительные усталостные испытания натурных колес. Испытания проводились во виникте на гидравлическом пульсаторе ЦДМ-200ГУ. Коэффициент асимметрии - 10, базовое число циклов нагружения - 106. Усталостные испытания показали, что передел выносливости опытных колес составил 410 Н/мм² что на 25-30% выше, чем стандартных.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика и предложен метод повышения усталостной прочности цельнокатанных колес скоростного подвижного состава путем формирования требуемых параметров качества поверхности слоя в элементах колеса при механической обработке.
2. Установлены требования к параметрам качества поверхности слоя дисков колес скоростного подвижного состава, на основании чего предложены режимы их механической обработки. Сравнительные натурные усталостные испытания цельнокатанных колес поезда "Аврора" показали, что выполнение этих требований обеспечивает повышение предела выносливости колес до 410 Н/мм^2 что на 25-30% выше, чем стандартных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Школьник А.М., Сунгурев А.С. Прогнозирование предела выносливости и циклической несущей способности цельнокатанных колес //Вестник ВНИИЖТ. - 1986. -N2, -с. 35-39.
- [2] Сунгурев А.С. Методика оценки предела усталости цельнокатанных колес //Вестник ВНИИЖТ. - 1984. -N7. -с. 42-44.
- [3] Повышение качества деталей подвижного состава управлением остаточными напряжениями /Алексин С.В, Заболотьев А.Г. и др. //Совершенствование технологического процесса ремонта и формирования колесных пар подвижного /Межвыз. сборник. - Л.: ЛИИЖТ. 1979. - с. 84-88.
- [4] Беженаров С.А., Иванов И.А. Исследование технологической наследственности как средства повышения надежности цельнокатанных колес. -Л.: 1988. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 20.10.88, N4443.
- [5] Иванов И.А., Беженаров С.А. Повышение усталостной прочности цельнокатанных колес //Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej/ seria TRANSPORT. - GLIWICE, 1990. -z.15, -s. 105-118.
- [6] Ситаж М. Методы повышения работоспособности элементов пары системы колесо-рельс: Дис... канд техн. наук. - Л.: ЛИИЖТ, 1986. 195 с.
- [7] Иванов Н.А. Управление качеством функционированием колес рельсового транспорта //Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej/seria TRANSPORT. - GLIWICE, 1990. -z.15, -s.93-103.
- [8] Силин С.С. Метод подобия при резании металлов -М.: Машиностроение, 1979 - 152с.

- [9] Безъязычный В.Ф. Теоретические основы автоматизации расчета режимов резания, обеспечивающих заданные требования к детали //Оптимизация операций механической обработки/ Межвуз. сборник. - Ярославль: ЯНИ, 1984. -ц. 15-23.
- [10] Есаулов В.П., Сладковский А.В. Применение полуузалитического МКЭ к расчету тел вращения под действием несимметричной нагрузки. - Днепропетровск: 1989. - Деп. в Укр. ЦИНТИ 02.0189, N14, -Ук. 89. - с. 18
- [11] Бонк Р., Мрудчаньска В. Приложение IBM PC к оценке напряженного состояния колесных пар //Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej/ seria TRANSPORT - Gliwice, 1989, - z.14. - s. 25-40.
- [12] Bak R., Gajek K., Zacharski M. Metoda numeryczna statycznej analizy stanu naprężenia w kolejowych zestawach kołowych. //Zeszyt Naukowy IPKM 27/61. - Gliwice, 1977 - 43 s.

Recenzent Prof. dr hab. inż. Karol Reich

Wprowadził do Redakcji 24.03. 1993