

Seria: GÓRNICtwo z. 144

1st International Conference - Reliability and Durability
of Machines and Machinery Systems in Mining
1986 JUNE 16-18 SZCZYRK, POLAND

Станислав МИКУЛА

Силезский политехнический институт
Гливице, ПНР

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН
ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Резюме. В данной работе автор предлагает ввести оценку эффективности упрочнения деталей горных машин поверхностным пластическим деформированием (ППД) с помощью параметра, учитывающего конечную цель любого способа упрочнения - повышение ресурса деталей машин.

На основании формулы Фроста и Дугдала определена долговечность деталей машин, упрочненных ППД и работающих в условиях высоких усталостных нагрузок.

Для оценки эффективности упрочнения деталей горных машин с точки зрения повышения долговечности введен параметр Δ , который представляет собой относительный прирост долговечности по (после) упрочнению (-ия) пластическим поверхностным деформированием. Этот параметр может быть вычислен для известных значений остаточных напряжений сжатия, глубины упрочненного слоя и критических значений глубины трещины при конкретных условиях (для конкретных условий).

Анализ формулы относительного прироста долговечности позволяет определить оптимальные параметры упрочнения деталей горных машин ППД уже на стадии их проектирования.

1. ВВЕДЕНИЕ

В горно-транспортных машинах многие детали работают не только в условиях весьма высоких циклических нагрузок, но и в условиях удара.

Эти нагрузки вызывают усталостные разрушения - поломки и усталостное выкрашивание рабочих поверхностей деталей. Усталостные разрушения выводят из строя такие элементы забойных машин, как тяговые органы, резцы угольных комбайнов, зубья зубчатых колес, шлицевые соединения и др.

Усталостные разрушения значительно снижают ресурс и надежность горных машин. Для повышения усталостной прочности деталей горных машин используются такие технологические методы, как поверхностная (-ые) термическая и химико-термическая обработки, термомеханическая обработка, поверхностная пластическая деформация (ППД).

В последнее годы все большее распространение получают комбинированные способы, включающие в себя какой-либо тепловой метод в сочетании с ППД.

Многие авторы оценивают эффективность упрочнения деталей машин ППД такими механическими и геометрическими параметрами, как твердость упрочненного слоя (НВ), уровень остаточных напряжений сжатия, глубина наклепа, шероховатость поверхности упрочненной детали.

В данной работе автор предлагает ввести комплексную оценку эффективности упрочнения поверхностным пластическим деформированием при помощи параметра, учитывающего конечную цель любого способа упрочнения — долговечность деталей машин.

Можно принять, что долговечность — это число циклов нагружения до усталостного разрушения в определенных условиях работы деталей машин.

2. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Ресурс деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок, складывается из трех периодов: зарождения, постепенного роста и мгновенного распространения трещины (долома). По данным некоторых исследователей период постепенного роста трещины занимает 90–98% всего жизненного ресурса деталей машин [1]. Поэтому этот период можно взять за основу при оценке долговечности.

Скорость роста усталостной трещины в этот период может быть описана с той или иной достоверностью различными формулами, обзор которых представлен в работе С. Коцаньды [1].

Для дальнейших рассуждений о долговечности деталей машин, испытывающих циклические растягивающие нагрузки, примем для определения скорости роста трещин формулу Фроста и Дугдала

$$\frac{dh}{dN} = kb\sigma^m, \quad (1)$$

где

h, dh — соответственно глубина усталостной трещины и её приращение;

N — число циклов нагружения;

k, m — коэффициенты, устанавливаемые экспериментально;

σ — максимальные напряжения цикла.

Исключив из рассмотрения периоды зарождения и мгновенного распространения трещины, долговечность деталей машин можно приблизительно определить, интегрируя выражение (1) в пределах глубины трещины, отвечающих периоду постепенного её роста

$$\int_{h_0}^{h_{kp}} \frac{dh}{h} = \int_0^N k b \sigma^m dN$$

где

- h_H - начальное значение глубины развивающейся усталостной трещины;
 $h_{кр}$ - критическое значение глубины трещины, при котором наступает мгновенное распространение трещины по всему оставшемуся сечению, т.е. деталь теряет работоспособность.

Роль начальной трещины могут выполнять концентраторы напряжений в виде дефектов в приповерхностной зоне (риски от механической обработки, неметаллические включения, микротрещины от термической обработки и др.).

Если, рассматривая постоянный режим нагружения детали машин, принять циклическое напряжение $\sigma = \text{const}$, тогда

$$N = \frac{1}{k \sigma^m} \ln\left(\frac{h_{кр}}{h_H}\right) \quad (3)$$

Допустим, в результате упрочнения детали ППД в поверхностном слое её возникли остаточные напряжения сжатия величиной $\sigma_{ост}$, усредненной по глубине упрочненной зоны h_y . В этом случае скорость роста трещины будет определяться алгебраической суммой действующих (растягивающих) и остаточных (сжимающих) напряжений

$$\frac{dh}{dN} = kh(\sigma - \sigma_{ост})^m \quad (4)$$

Анализ зависимости (4) показывает, что для замедления процесса роста трещины следует стремиться к созданию в упрочняемых деталях остаточных напряжений сжатия, близких по величине к действующим циклическим напряжениям.

Следует заметить, что для тяжелонагруженных деталей машин при используемых в настоящее время технологических способах упрочнения ППД создаваемые остаточные напряжения значительно меньше величины действующих растягивающих циклических напряжений, т.е. $|\sigma_{ост}| \ll |\sigma|$, а глубина проникновения их лежит в пределах $h_H < h_y < h_{кр}$.

Если $(\sigma - \sigma_{ост}) = \text{const}$, то интегрируя выражение (4) в интервале от h_H до h_y , получим число циклов нагружения, соответствующее периоду распространения трещины через упрочненную зону

$$N'_y = \int_{h_H}^{h_y} \frac{1}{k(\sigma - \sigma_{ост})^m} \frac{dh}{h} = \frac{1}{k(\sigma - \sigma_{ост})^m} \ln\left(\frac{h_y}{h_H}\right) \quad (5)$$

Если предположить, что скорость роста усталостной трещины за упрочненной зоной будет определяться зависимостью (1), тогда, интегрируя выражение (1) в интервале от h_y до $h_{кр}$, получим число циклов нагружения, отвечающее периоду роста усталостной трещины за упрочненной зоной до периода мгновенно-

го распространения трещины, когда в результате долома происходит окончательное разрушение детали

$$N'_y = \int_{h_y}^{h_{кР}} \frac{1}{k \sigma^m} \frac{dh}{h} = \frac{1}{k \sigma^m} \ln \left(\frac{h_{кР}}{h_y} \right) \quad (6)$$

В таком случае долговечность упрочненных деталей машин N_y будет выражаться суммой N'_y и N''_y

$$N_y = N'_y + N''_y$$

$$N_y = \frac{1}{k} \left[\frac{1}{(\sigma - \sigma_{оот})^m} \ln \left(\frac{h_y}{h_H} \right) + \frac{1}{\sigma^m} \ln \left(\frac{h_{кР}}{h_y} \right) \right] \quad (7)$$

3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Для практической оценки эффективности упрочнения деталей машин с точки зрения повышения их долговечности самым важным является прирост долговечности, полученный за счёт примененного способа упрочнения.

В случае упрочнения поверхностным пластическим деформированием относительный прирост долговечности определяет выражение:

$$\Delta = \frac{N_y - N}{N} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где

N_y - долговечность деталей машин по упрочнению (после упрочнения),
 N - долговечность деталей машин без упрочнения.

Параметр Δ может быть принят как мера эффективности упрочнения деталей машин ППД.

Подставив в формулу (8) выражения (6) и (3) и сделав преобразования, получим

$$\Delta = \left[\frac{\left(\frac{1}{\sigma - \sigma_{оот}} \right)^m - 1}{1 - \frac{\sigma_{оот}^m}{\sigma^m}} - 1 \right] \frac{\ln \left(\frac{h_y}{h_H} \right)}{\ln \left(\frac{h_{кР}}{h_H} \right)} \cdot 100\% \quad (9)$$

Согласно экспериментам Дугдала для конструкционных сталей можно принять $m = 3$.

Как видно из выражения (9), эффективность упрочнения возрастает при увеличении прежде всего значения остаточных напряжений сжатия, а также глубины упрочненного слоя и будет тем больше, чем меньше критическое значение глубины трещины для конкретных условий. Формула (9) позволяет легко оценить ожидаемую эффективность упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования уже в стадии их проектирования.

Нужные для формулы (9) параметры упрочненного слоя могут быть определены на образцах, изготовленных из того же материала, что и проектируемые детали.

Критическое значение глубины трещины можно определить по различным данным механики разрушения.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ УПРОЧНЕНИЯ ППД С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

С целью повышения эффективности упрочнения деталей машин (согласно формуле (9)) необходимо разрабатывать такие технологические способы ППД, которые позволили бы увеличить в первую очередь значение $\sigma_{\text{ост}}$ на возможно большей глубине

К настоящему времени разработано и внедрено в производство довольно много различных способов ППД для упрочнения деталей типа "зубчатое колесо" [2].

В Силезском политехническом институте разработаны более эффективные методы упрочнения круглозвенных цепей горного оборудования с использованием поверхностного пластического деформирования [3]. Результаты практических испытаний совпали с предшествующими теоретическими выводами.

Для упрочнения деталей горных машин, работающих в условиях весьма высоких циклических нагрузок, следует выделить как наиболее перспективные следующие способы:

1. Наклеп дробью в струе жидкости (гидродробеструйный) с высокой кинетической энергией потока. Кинетическая энергия высоконапорной струи жидкости будет увеличивать энергию микроударов упрочняющих элементов (дробинки), что обеспечит большую величину остаточных напряжений сжатия, проникающих на большую глубину, чем при обычном дробеструйном наклепе. Этот метод пригоден для деталей машин любой конфигурации.
2. Для круглозвенных цепей и соединительных звеньев тяговых органов забойных машин большую эффективность упрочнения можно получить поверхностным наклепом в состоянии предварительного напряжения растягивающей силой. Этот способ может быть использован в устройствах, концепции которых представлены в работе [3].
3. При дробеструйном наклепе деталей типа "зубчатое колесо" (зубчатые полумуфты, звездочки, шлицевые валы, турбинные диски, гребные винты и т.п.) представляется перспективным принудительное встречное вращение упрочняемых деталей с повышенными скоростями опять же для увеличения энергии соударения со всеми вытекающими последствиями.

В случае использования гидродробеструйного наклепа следует ожидать еще более высокий эффект упрочнения. При такой технологии ППД высокая эффективность будет обуславливаться дополнительным воздействием струи жидкости, вызывающим упругие растягивающие напряжения на наклепываемой дробью поверхности зубьев за счет их изгиба. При выходе упрочненного зуба из зоны воздействия струи растягивающие напряжения упруго исчезают, увеличивая тем самым остаточные напряжения сжатия $\sigma_{ост}$ в наклепанном слое.

При такой технологии для каждого типоразмера деталей необходимо экспериментальным путем подобрать свои параметры режима: угол атаки и скорость струи, скорость вращения детали, время обработки.

4. Для деталей типа "зубчатое колесо" (прежде всего крупногабаритных) можно использовать комбинированный способ упрочнения, заключающийся в том, что ППД осуществляется в сочетании с операцией нагружения упрочняемых элементов, вызывающей в его поверхностном слое упругие растягивающие напряжения. При этом способе упрочнения ППД может выполняться различными деформирующими элементами (дробью, роликами, шариками, чеканами), а также энергией взрыва. Правомерно ожидать, что этот комбинированный способ упрочнения позволит получить наибольшие значения $\sigma_{ост}$ при значительной глубине их залегания.

ВЫВОДЫ

Представленный в работе метод оценки эффективности упрочнения поверхностным пластическим деформированием может быть использован уже на стадии проектирования тяжело нагруженных деталей горных машин.

Относительный прирост долговечности деталей машины, упрочненных ППД, определяет формула (9) на основании параметров материала, упрочненного слоя и условий работы.

Перечисленные методы повышения уровня остаточных напряжений сжатия должны являться завершающей стадией всего комплекса технологических мероприятий по повышению долговечности деталей, работающих при циклических растягивающих нагрузках.

Использование предлагаемых методов ППД для упрочнения деталей приводов тяжело нагруженных машин позволит увеличить их долговечность и надежность не только за счет повышения усталостной прочности, но и за счет увеличения износостойкости деталей, а также образования на их рабочих поверхностях микро рельефа (близкого к регулярному), улучшающего условия смазки [4].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Коцаньда С.: Усталостные разрушения металлов. ВНТ, Варшава 1972.
[2] Морозов В.И., Шубина Н.Б.: Наклеп дробью тяжело нагруженных зубчатых колес. "Машиностроение", Москва 1972.

- [3] Микула С.: Усталостная прочность приводных цепей скребковых конвейеров, стругов и угледобывающих комбайнов. Исследовательские работы Центра механизации горного дела "КОМАГ". Гливице 1978.
- [4] Швейдер Ю.Г.: Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микропоре-
льефом. "Машиностроение", Ленинград 1982.

Recenzent: Doc. dr inż. Karol REICH

Wpłynęło do Redakcji: marzec 1986 r.

PODNIESIENIE TRWAŁOŚCI ELEMENTÓW MASZYN GÓRNICZYCH W WYNIKU OBRÓBKI ZGNIOTEM POWIERZCHNIOWYM

S t r e s z c z e n i e

W referacie przedstawiona została metoda oceny skuteczności obróbki zgniotem powierzchniowym dla elementów maszyn górniczych pracujących w warunkach dużych obciążeń zmiennych. Wychodząc z zależności na prędkość rozwoju pęknięć zmęczeniowych wyprowadzono zależność względnego przyrostu trwałości zmęczeniowej od parametrów strefy umocnionej w wyniku zastosowania zgniotu powierzchniowego. Określony został związek między przyrostem trwałości zmęczeniowej a wartością naprężeń własnych ściskających oraz głębokości ich zalegania w warstwie umocnionej zgniotem powierzchniowym.

Wyprowadzona w referacie zależność pozwala na dokonanie oceny efektywności planowanego zabiegu umacniania zgniotem powierzchniowym już na etapie projektowania.

Na podstawie analizy zależności względnego przyrostu trwałości zmęczeniowej przedstawiono zalecenia praktyczne pozwalające na wybór najkorzystniejszego sposobu obróbki elementów maszyn górniczych przy wykorzystaniu zgniotu powierzchniowego.

IMPROVEMENT OF THE LIFE OF ELEMENTS OF MINING MACHINES AS THE RESULT OF THE TREATMENT BY SURFACE WORK-HARDENING

S u m m a r y

The paper presents a method of estimating the effectiveness of the treatment by surface work-hardening for elements of mining machines. Starting from the dependence of the speed of development of fatigue cracks, the dependence of relative increase fatigue life on the parameters of the zone which underwent surface strain hardening is derived. The relationship between the increase of fatigue life and the value of compressive stresses and the depth of their occurrence in the layer which underwent surface strain hardening is determined.

The derived dependence makes it possible to estimate the effectiveness of the treatment by surface work-hardening at the stage of designing.

Basing on the analysis of the relationship between the relative increase of fatigue life, practical guidelines are presented. The guidelines make it possible to choose the best method of the treatment of elements of mining machines with the help of surface work-hardening.