

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.7.09

Е. Н. Зык, В. В. Плешаков, А. Н. Шурпо

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются детали, изготовленные из высокопрочной конструкционной стали марки 30ХГСН2А. Предметом исследования являются процессы формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей при наличии предварительной наработки. Цель работы – оценка эффективности повторного упрочнения деталей из стали типа 30ХГСН2А с целью восстановления после эксплуатации.

Материалы и методы. Исследование процессов формирования остаточных напряжений выполнялось посредством проведения ряда многофакторных экспериментов с применением методов неразрушающего контроля и обработки полученных данных при помощи методов регрессионного анализа.

Результаты. Результатом проведенных исследований стало получение регрессионных моделей зависимости изменения напряжений, амплитуды акустического ультразвукового сигнала и величины усталостной прочности деталей от факторов обработки поверхностного пластического деформирования и долговечности. Предложен оптимальный режим обработки.

Выводы. Анализ полученных результатов позволил подтвердить существующие теории о физической природе усталостных процессов и сделать вывод об эффективности применения процесса повторного упрочнения деталей после эксплуатации с целью восстановления.

Ключевые слова: наработка, долговечность, усталостная прочность, обработка дробью, поверхность, ремонт, неразрушающие методы контроля, ультразвуковой метод, магнитошумовой метод.

E. N. Zyk, V. V. Pleshakov, A. N. Shurpo

EFFICIENCY OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION OF DETAILS MADE OF HIGH-STRENGTH STEELS WHILE REPAIRING

Abstract.

Background. The research object is the details made of high-strength constructional steel of 30HGSN2A grade. The research subject is a process of fatigue stress formation in a surface layer in the presence of preliminary running time. The aim of the research is to assess efficiency of repeated hardening of details from steel of 30HGSN2A grade for the purpose of repair after exploitation.

Materials and methods. A fatigue stresses formation research was carried out by means of several multifactorial experiments using methods of non-destructive testing. The research findings were processed by methods of regressive analysis.

Results. The research resulted in acquisition of regression models of dependence of changes of stresses, ultrasonic acoustic signal amplitudes and fatigue point values on processing factors and durability. The authors propose an optimal treatment schedule.

Conclusions. The analysis of the research data allowed to confirm existing theories about the physical nature of fatigue processes and to draw a conclusion about efficiency of using the repeated hardening process after exploitation for the purpose of repair.

Key words: preliminary operation time, life time, fatigue strength, treatment by shot, surface, repair, nondestructive control methods, hypersonic method, x-ray diffraction method.

Введение

Детали из высокопрочных сталей типа 30ХГСНА и 30ХГСН2А, которые работают в весьма тяжелых условиях, под воздействием знакопеременных циклических нагрузок во время эксплуатации довольно сильно изнашиваются. Выход из строя таких деталей приводит, как правило, не просто к авариям, а к катастрофам. Повышение уровня усталостной прочности таких деталей является одной из первостепенных задач.

1. Цели исследования

В 80-е гг. прошлого века на отечественных предприятиях при производстве деталей широко внедрялась упрочняющая обработка. Эффективным технологическим методом отделочно-упрочняющей обработки являются методы поверхностного пластического деформирования (ППД), в частности дробеметная обработка, которая позволяет упрочнять поверхности деталей различного сложного профиля и размеров с высокой эффективностью [1]. Многие детали, упрочняемые при производстве, пройдя свой плановый ресурс, поступают на ремонтные предприятия. Во время восстановления таких деталей при ремонте становится вопрос о целесообразности проведения повторного упрочнения.

2. Применение неразрушающих методов контроля

При восстановлении деталей из высокопрочных сталей актуальной является проблема оценки уровня накопления усталостных повреждений в поверхностном слое. Для оценки применяются неразрушающие методы контроля – ультразвуковой, рентгеноструктурный, магнитошумовой. Данные способы контроля позволяют с высокой степенью точности оценить технологические свойства изделия без разрушения металла, не сталкиваясь, таким образом, с проблемой выборочности контроля качества. В частности, магнитошумовой метод основан на эффекте Баркгаузена (магнитном явлении, заключающемся в возникновении в ферромагнетике необратимых скачкообразных смещений междоменных границ), а акустический метод – на изменении акустической проводимости вследствие изменения реологических характеристик материала [2].

2.1. Оценка технологических свойств материала после наработки при помощи неразрушающих методов контроля

При проведении экспериментов для оценки уровня накопления усталостных повреждений исследовались цилиндрические образцы диаметром $D = 18$ мм с шейкой диаметром $d = 8$ мм из стали типа 30ХГСНА, закаленной на твердость 48–50 HRCэ, шейка образца шлифовалась до $R_a = 0,16$. Усталостное нагружение осуществлялось при пульсирующем изгибе на машине МУИ-6000.

На каждом из уровней нагружения проводилось испытание последовательно в несколько этапов до определенного числа циклов. После этого наиболее нагруженная часть шейки образца исследовалась с помощью ультразвукового и рентгеноструктурного методов.

Ультразвуковой контроль образцов проводился на приборе ДУК-66 эхо-импульсивным методом в теновом варианте, при этом измерялась амплитуда сигнала в децибелах. Ультразвуковые сигналы вводились через масло от облучающей головки и принимались аналогичной головкой на противоположной торцевой поверхности. Наличие шейки в центральной части образца способствовало концентрации ультразвуковых колебаний в исследуемом месте. Рентгеноструктурный анализ материала образца проводился на дифрактометре ДРОН-05 в железном K_α -излучении. Параметром, характеризующим изменения, происходящие в поверхностном слое материала, была выбрана величина смещения линии отражения в зависимости от количества циклов нагружения по сравнению с линией отражения ненагруженного образца. Так как исследовались шлифованные образцы, имеющие различные исходные остаточные напряжения в поверхностном слое после механической обработки, фактически определялось влияние числа циклов и уровня нагружения на величину этих напряжений. Изменение же указанных напряжений может характеризовать, в свою очередь, изменения, происходящие в материале при усталости. После каждого этапа нагружения образцов и проведения контроля оценивались величины относительного изменения амплитуды сигнала ультразвуковых колебаний ($\Delta A = A_{\text{исп}} - A_0$) и величины напряжений ($\Delta \sigma_1 = \sigma_{1\text{исп}} - \sigma_{10}$) по сравнению с исходными.

Для исследования эффективности применения дробеметной обработки при восстановлении деталей был проведен многофакторный эксперимент, в ходе которого обработке подвергались образцы из высокопрочной конструкционной стали 30ХГСН2А. Обработка производилась при помощи пневмодинамического дробеметного устройства пистолетного типа. Усталостное нагружение осуществлялось при пульсирующем растяжении на машине ГМС-2 с частотой нагружения 12–15 циклов/мин на базе 50×10^3 циклов. Эксперимент проходил в следующем порядке: предварительная упрочняющая обработка → усталостное нагружение (наработка) → повторная упрочняющая обработка → нагружение до разрушения. Напряжение предварительной наработки $\sigma_a = 1,3$ ГПа.

Для оценки циклического упрочнения стали введено понятие относительной наработки K_c [3]:

$$K_c = \text{Lg } N / \text{Lg } N_p,$$

где $Lg N$ – число циклов нагружения на заданном уровне остаточных напряжений; $Lg N_p$ – число циклов нагружения до разрушения образцов.

Регрессионные модели процесса усталости и графические зависимости изменений напряжений и амплитуды ультразвукового сигнала от долговечности при различных уровнях нагружения и исходных значениях $\sigma_{исп}$ и A_0 (рис. 1, 2) имеют вид

$$\Delta\sigma_1 = -28,679Kc + 0,1287\sigma_0Kc^2 + 82,276Kc^3 - 1,3786\sigma_0Kc - 85,19Kc^2 + 0,044\sigma_{исп}Kc^2, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Критерий информативности модели $F_{инф} = 2,3$:

$$\Delta A_0 = -221,5Kc^2 + 4,46Kc^2 A_0 + 217,7Kc - 4,38A_0Kc - 0,054\sigma_{исп}Kc. \quad (3)$$

Критерий информативности модели $F_{инф} = 1,12$.

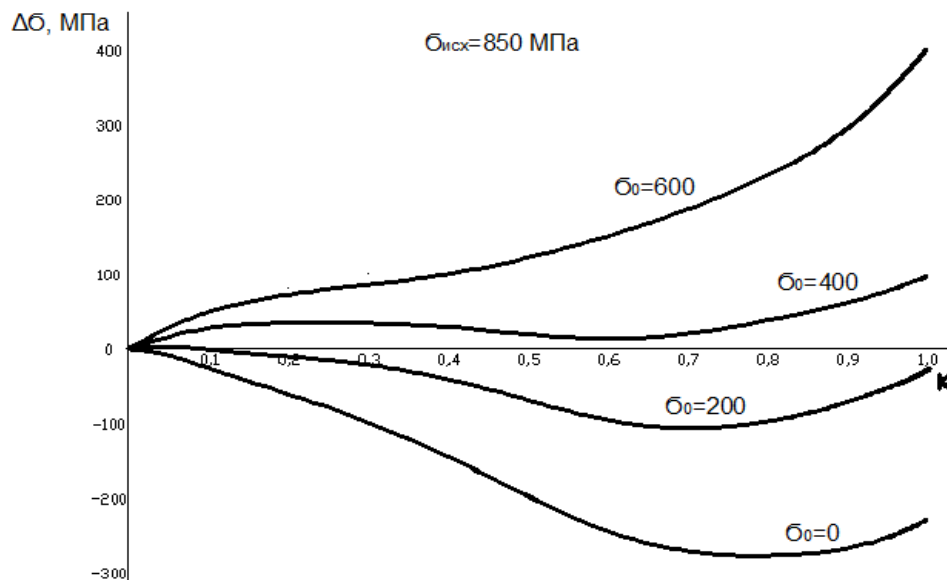


Рис. 1. Зависимость изменения остаточных напряжений в поверхностных слоях от наработки образцов при различных исходных напряжениях (при $\sigma_a = 0,85$ ГПа)

Анализируя изменения поверхностных напряжений в зависимости от долговечности образца (рис. 2) при $\sigma_{10} = -0,40$ ГПа, как часто встречающихся после обработки поверхности стальных деталей шлифованием, по долговечности можно выделить три характерных периода изменения $\Delta\sigma_1$:

I период – от момента начала нагружения до долговечности $Kc = 0,2$, в течение которого происходит снижение поверхностных сжимающих напряжений, т.е. проходят процессы разупрочнения поверхностного слоя;

II период – в пределах наработки $Kc = 0,2-0,7$. В этот период происходит нарастание сжимающих напряжений в поверхностных слоях материала, т.е. упрочнение, вызванное тренировкой при циклических нагрузках;

III период – от $Kc = 0,7$ до разрушения образца происходит повторное уменьшение величины $\Delta\sigma_1$, что может быть обусловлено реализацией поверхностных напряжений в образующихся микро- и макротрещинах.

Рассматривая эти зависимости при исходных поверхностных напряжениях $\sigma_{10} = -0,60$ и $\sigma_{10} = 0$ ГПа, можно видеть, что при их увеличении (от 0 до -60) происходит сглаживание I периода и интенсификация II периода. Исходя из этого можно предположить о большей упрочняемости материала (имевшего большие исходные сжимающие поверхностные напряжения), происходящей во время его нагружения.

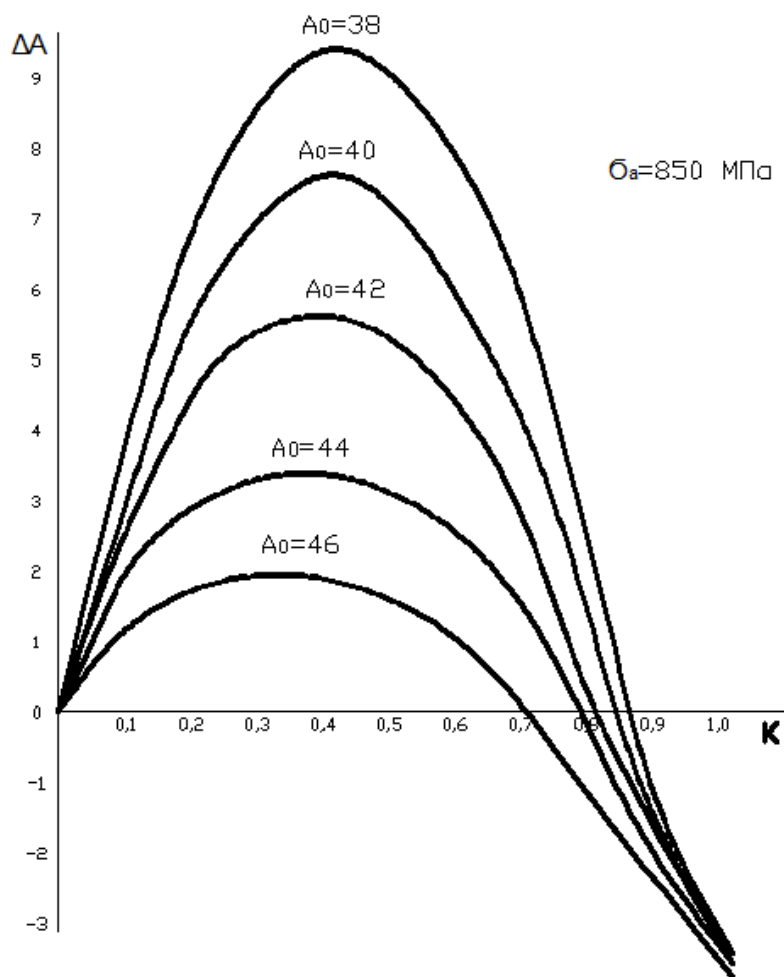


Рис. 2. Зависимость изменения амплитуды ультразвуковых колебаний от наработки при исходных амплитудах A_0 (дБ) при $\sigma_a = 0,85$ ГПа

Рассматривая зависимости изменения затухания амплитуды ультразвукового сигнала от долговечности (рис. 2), можно сделать вывод о том, что в первый момент нагружения (до $Kc = 0,4$) происходит «упорядочивание» структуры материала, приводящее к повышению амплитуды ультразвукового сигнала.

Дальнейшее нагружение вызывает появление таких дефектов в материале, которые затрудняют прохождение сигнала, и происходит уменьшение его амплитуды. Причем следует отметить, что в более «дефектном» с точки зрения ультразвуковых колебаний материале на первых стадиях нагружения процессы «упорядочивания» происходят более интенсивно.

Таким образом, характер зависимостей совпадает с теми представлениями о физической природе усталостных процессов, которые доминируют в настоящее время [4].

3. Оценка эффективности повторной упрочняющей обработки во время ремонта

На основе статистической обработки экспериментальных данных разработана регрессионная модель зависимости величины усталостной прочности от технологических факторов обработки и величины относительной наработки (P, D, T, Kc):

$$\begin{aligned} \lg N = & 4,343 - 0,03371 \cdot D + 0,2476 \cdot P \cdot D - 0,02753 \cdot D^2 - 0,1436 \cdot T - \\ & - 0,2621 \cdot PT + 0,04646 \cdot D \cdot T + 0,03247 \cdot T^2 + 1,33 \cdot Kc - 2,557 \cdot P \cdot Kc + \\ & + 0,04148 \cdot D \cdot Kc + 0,04903 \cdot T \cdot Kc - 1,228 \cdot Kc^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Данная модель обладает достаточно высокой информативной способностью, критерий информативности $F_{\text{инф}} = 4,4$.

Графическая интерпретация данной модели представлена на рис. 3.

Анализируя полученные данные, стоит отметить, что повышение давления в упрочнительной машине не приводит к соответственному повышению показателей усталостной прочности деталей. То же можно сказать и относительно диаметра дроби – его увеличение не всегда благоприятно сказывается на усталостной прочности. Таким образом, «ужесточение» режима обработки негативно влияет на прочностные свойства деталей. Одной из основных причин может быть явление «перенаклепа», при котором происходит знакопеременный процесс формирования остаточных напряжений в поверхностном слое, приводящий к разупрочнению детали.

Согласно полученным данным оптимальным режимом обработки является режим, в котором используются следующие технологические параметры:

- давление в установке 0,1 МПа;
- диаметр дроби 1 мм;
- время обработки 2 мин,

при величине относительной наработки $Kc = 0,6$.

Заключение

Использование неразрушающих методов контроля позволило выявить основные технологические свойства материала после наработки, а также определить характер протекания усталостных процессов в поверхностном слое детали во время эксплуатации. Полученные данные могут служить предпосылкой для дальнейшего исследования процессов обработки ППД с целью восстановления деталей во время ремонта.

Данные эксперимента, проведенного с целью исследования зависимости усталостной прочности от технологических факторов дробеметной обработки, подтверждают выводы, полученные в результате контроля неразрушающими методами.

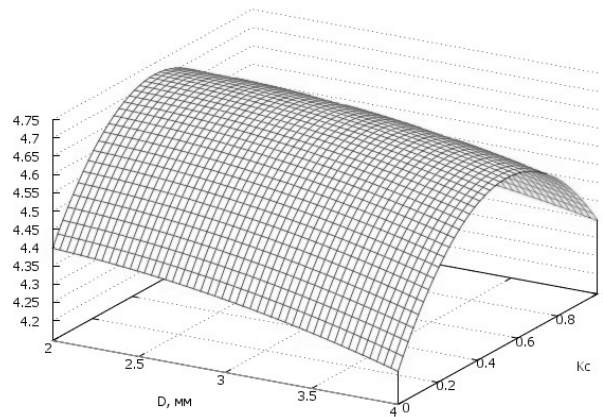
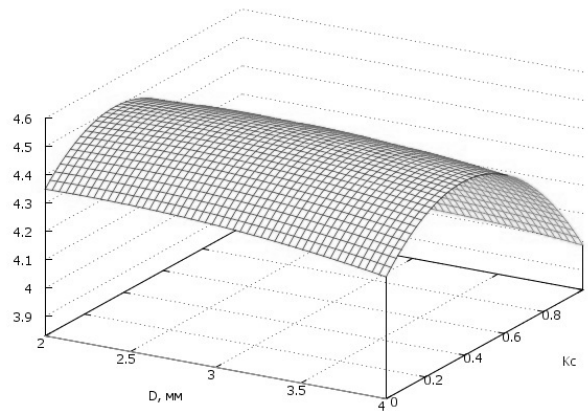
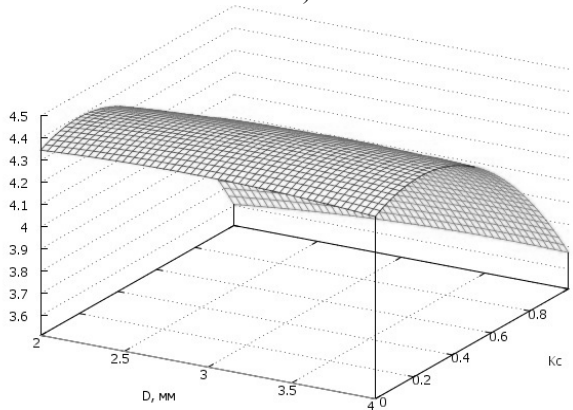
**a)****б)****в)**

Рис. 3. Зависимость усталостной прочности от технологических факторов обработки и величины относительной наработки:
a – $P = 0,1$ МПа; **б** – $P = 0,25$ МПа; **в** – $P = 0,4$ МПа

Основным выводом данной работы является доказательство эффективности применения повторной обработки методами ППД деталей, уже бывших в эксплуатации, во время ремонта. Экспериментально доказано, что при относительном уровне наработки $K_c = 0,6$, показатель усталостной прочности увеличивается на 5–7 %, что является существенным приростом.

Список литературы

1. **Плешаков, В. В.** Программное поверхностное пластическое деформирование деталей высокопрочных сталей / В. В. Плешаков, А. Г. Схиртладзе, Т. В. Никифорова, В. А. Долгов. – М. : ИНТС, 2002. – 111 с.
2. **Соколик, А. И.** Контроль технологических и эксплуатационных свойств изделий из высокопрочных сталей методом эффекта Баркгаузена : дис. ... канд. техн. наук. / А. И. Соколик. – Минск, 1984. – 164 с.
3. **Плешаков, В. В.** Повышение усталостной прочности деталей при ремонте / В. В. Плешаков, Д. А. Албагачиев, Е. Н. Зык // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении* : тр. II Междунар. науч. конф. – М. : ИМАШ РАН, 2012. – С. 365–368.
4. **Плешаков, В. В.** Оценка усталостных повреждений поверхностного слоя деталей / В. В. Плешаков // *Информатика и технологии* : межвуз. сб. тр. науч.-техн. конф. Моск. гос. ун-та приборостр. и информ. / под ред. к.т.н., доц. В. Г. Белова, д.т.н., проф. Н. Н. Холина. – Вып. XVII. – М. : МГУПИ, 2011. – С. 226–235.

References

1. Pleshakov V. V., Skhirtladze A. G., Nikiforova T. V., Dolgov V. A. *Programmnoe poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie detaley vysokoprochnykh staley* [Programmed surface plastic deformation of detail made of high-strength steels]. Moscow: INTS, 2002, 111 p.
2. Sokolik A. I. *Kontrol' tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv izdeliy iz vysokoprochnykh staley metodom effekta Barkgauzena: dis. kand. tekhn. nauk.* [Testing of technological and operational properties of products made of high-strength steels by the Barkhausen effect method: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Minsk, 1984, 164 p.
3. Pleshakov V. V., Albagachiev D. A., Zyk E. N. *Fundamental'nye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii: tr. II Mezhdunar. nauch. konf.* [Fundamental research and innovative technologies in machine building: proceedings of II International scientific conference]. Moscow: IMASh RAN, 2012, pp. 365–368.
4. Pleshakov V. V. *Informatika i tekhnologii: mezhvuz. sb. tr. nauch.-tekhn. konf. Mosk. gos. un-ta priborostr. i inform.* [Informatics and technologies: interuniversity proceedings of the scientific and technical conference of Moscow university of instrument engineering and informatics]. Issue. XVII. Moscow: MGUPI, 2011, pp. 226–235.

Зык Евгений Николаевич

аспирант, Московский государственный университет приборостроения и информатики (Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)

E-mail: zyk.eugene@gmail.com

Zyk Evgeniy Nikolaevich

Postgraduate student, Moscow State University of Informatics and Instrument Engineering (20 Stromynka street, Moscow, Russia)

Плешаков Виктор Викторович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра ВТ-12, Московский
государственный университет
приборостроения и информатики
(Россия, г. Москва, ул. Стромынка, 20)

E-mail: pleshakovvv@yandex.ru

Pleshakov Viktor Viktorovich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department VT-12,
Moscow State University of Informatics
and Instrument Negineering (20 Stromynka
street, Moscow, Russia)

Шурпо Александр Николаевич

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник лаборатории № 1,
Институт конструкторско-
технологической информатики РАН
(Россия, г. Москва, Вадковский
переулок, 18, строение 1а)

E-mail: a-shurpo@yandex.ru

Shurpo Aleksandr Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, senior
staff scientist, laboratory №1, Institute
of Engineering and Design Informatics
of the Russian Academy of Sciences
(building 1a, 18 Vadkovsky lane,
Moscow, Russia)

УДК 621.7.09

Зык, Е. Н.

**Эффективность поверхностного пластического деформирования
деталей из высокопрочных сталей при ремонте / Е. Н. Зык, В. В. Плеша-
ков, А. Н. Шурпо // Известия высших учебных заведений. Поволжский реги-
он. Технические науки. – 2015. – № 4 (36). – С. 109–117.**