

ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДРОБЬЮ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ВОССТАНОВЛЕНИИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются детали, изготовленные из высокопрочной конструкционной стали марки 30ХГСН2А. Предметом исследования является формирование прочностных свойств деталей в результате упрочняющей обработки дробью. Цель работы – обоснование эффективности упрочнения деталей дробью при производстве и восстановлении, обуславливающее повышение общего технического ресурса деталей.

Материалы и методы. Исследование процессов формирования прочностных свойств деталей 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 величины усталостной прочности деталей от факторов обработки пластического деформирования и долговечности. Предложены оптимальные режим обработки на этапах производства и восстановления. Рекомендован уровень наработки для проведения наиболее эффективного процесса восстановления.

Выводы. Анализ полученных результатов позволил подтвердить существующие теории о физической природе усталостных процессов и сделать вывод об эффективности применения процесса упрочнения деталей из высокопрочных сталей при производстве и после эксплуатации с целью восстановления и продления полного технического ресурса.

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

Е. Н. Зык, В. В. Плешаков

INFLUENCE OF FINISHING-HARDENING TREATMENT BY SHOT ON MECHANICAL STRENGTH CHARACTERISTICS OF DETAILS MADE OF HIGH-STRENGTH STEELS IN PRODUCTION AND RECONDITIONING

Abstract

Background. The research object is details made of the high-strength constructional steel of 30HGSN2A brand. The research subject is formation of detail's mechanical strength characteristics as a result of finishing-hardening treatment by shot. The purpose of the research is to evaluate the efficiency of hardening of details by shot in production and reconditioning, which causes an increase of details' general technical resource.

Materials and methods. The 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 fatigue point values on processing factors of surface plastic deformation and durability. The article proposes a schedule of optimal treatment at stages of production and reconditioning, and recommends a level of preliminary operating time for the most effective reconditioning.

Conclusions. The research data analysis allows to confirm the existing theories about the physical nature of fatigue processes and to draw a conclusion about the efficiency of using the hardening process at stages of production and after exploitation for reconditioning and extension of service life.

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

Введение

В конструкциях современных транспортных средств используется большое количество деталей, выполненных из различных типов сталей и сплавов. Широкое распространение в авиационной технике и в автомобилестроении получили конструкционные стали типа 30ХГСН2А, 30ХГСА, 25Х2ГНТА, 40ХСН2МА и др. Они относятся к группе среднелегированных высокопрочных сталей. К преимуществам вышеуказанных марок сталей стоит отнести высокую прочность, вязкость и пластичность. Из данных марок стали производятся высоконагруженные детали типа балок, работающих на срез шпилек и осей, роликов, пальцев гусеничных машин, а также крепежных изделий, подвергающихся осевой нагрузке [1]. При эксплуатации вышеперечисленные детали транспортной техники подвергаются постоянному воздействию целого ряда факторов, которые негативно влияют на их техническое состояние, ухудшают эксплуатационные характеристики. Так, например, ответственные детали шасси летательных аппаратов испытывают воздействие как статических, так и динамических эксплуатационных нагрузок [2].

1. Цели исследования

Согласно статистике в транспортной технике наибольшее количество неисправностей и отказов происходит в несущей системе и шасси, испытывающих наиболее сильное силовое вибрационное нагружение (рис. 1). Поскольку выход из строя таких деталей применительно к транспортной технике может привести не просто к авариям, но и к катастрофам, повышение надежности данных изделий, а также продление их эффективного технического ресурса являются одной из первоочередных задач.

В транспортном машиностроении с целью повышения ресурса деталей давно и успешно используется отделочно-упрочняющая обработка, в частности поверхностное пластическое деформирование (ППД).

К основным достоинствам ППД следует отнести образование мелкозернистой структуры металла и отсутствие термических дефектов, а также возникновение в поверхностном слое благоприятных остаточных напряжений сжатия. Использование методов ППД с учетом назначения оптимального режима обработки позволяет улучшить эксплуатационные свойства деталей, в частности повысить износостойкость, сопротивление усталости и контактной выносливости [3–6].

По причине того, что в современной транспортной технике подавляющее большинство деталей имеет сложный профиль наружной поверхности, наиболее подходящим методом отделочно-упрочняющей обработки является упрочнение дробью. Дробеупрочнительная обработка может проводиться при помощи дробеметных устройств, оснащенных центробежным дробеметным колесом, которое придает кинетическую энергию дробу, а также пневмодинамических упрочнительных устройств пистолетного типа, работающих от централизованной системы сжатого воздуха.

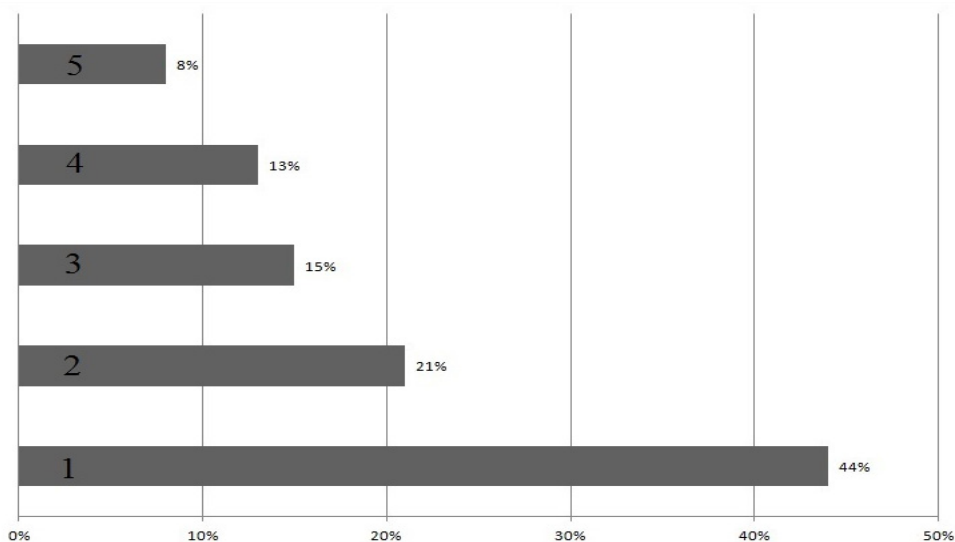


Рис. 1. Диаграмма распределения неисправностей систем транспортной техники:
1 – несущая система; 2 – шасси; 3 – гидросистема; 4 – силовая установка;
5 – прочие системы

2. Показатель интенсивности ударов дробью как технологический фактор упрочнения

В первую очередь при исследовании влияния обработки дробью на величину усталостной прочности следует унифицировать технологические характеристики процесса обработки с целью перехода от факторов, связанных с конструкцией конкретных устройств, к неким общим факторам, непосредственно определяющим процесс упрочнения. Поскольку процесс упрочнения с использованием пневмодинамического устройства непосредственно связан с давлением воздуха P (МПа) в системе, а дробеметной камеры – с массой загружаемой дроби M (кг), предлагается применение обобщающего фактора – интенсивности ударов дроби L ($\text{мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) о поверхность детали.

С целью определения основных зависимостей величины интенсивности обработки от технологических параметров упрочняющих устройств различного типа был проведен многофакторный эксперимент. Плоские образцы из стали типа 30ХГСН2А подвергались обработке дробью при помощи двух типов устройств. По результатам эксперимента были составлены регрессионные модели зависимостей интенсивности L ударов от массы M загружаемой дроби в камеру дробемета:

$$L(M) = 0,66 + 0,3M + 3M^2, \text{ 1/мм}^2 \cdot \text{с}; \quad (1)$$

и от давления P в системе пневмодинамического устройства:

$$L(P) = 2,302 \cdot 10^{-12} + 300P - 5,457 \cdot 10^{-12} \cdot P^2, \text{ 1/мм}^2 \cdot \text{с}. \quad (2)$$

Полученные регрессионные модели обладают высоким уровнем информативности и адекватны экспериментальным данным при 95 % доверительной вероятности. Информативный F -критерий применительно к модели (1) равен $F_{\text{инф}} = 2,25$, для модели (2) – $F_{\text{инф}} = 9,2$.

На основании полученных регрессионных моделей были построены соответствующие графические зависимости, представленные на рис. 2.

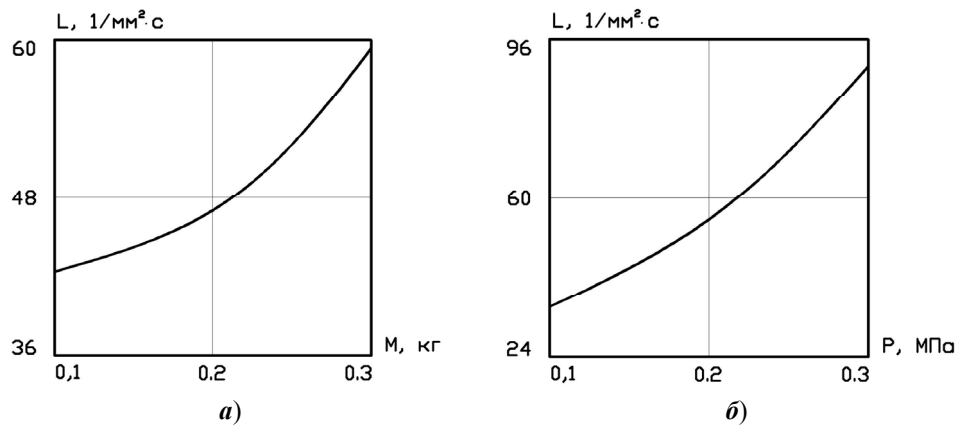


Рис. 2. Зависимость интенсивности ударов L ($\text{мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) дроби о поверхность детали от технологических факторов обработки различных упрочнительных устройств: *а* – дробеметной камеры (M , кг); *б* – пневмодинамического устройства пистолетного типа (P , МПа)

Стоит отметить схожий характер протекания полученных кривых, а также высокую прогностическую способность модели, что дает возможность использования параметра интенсивности ударов в качестве технологического фактора обработки при дальнейших исследованиях.

3. Исследования процесса упрочнения дробью при производстве

Основной целью обработки деталей методами ППД (в частности упрочнение дробью) является улучшение эксплуатационных характеристик и, в конечном счете, соответствующее повышение технического ресурса.

Для деталей, работающих в условиях больших знакопеременных нагрузок, показателем, лежащим в основе обеспечения ресурса, является величина усталостной прочности.

Для исследования процесса упрочнения дробью при производстве с целью обеспечения наибольшего уровня усталостной прочности деталей и, следовательно, их технического ресурса, был проведен многофакторный эксперимент, в ходе которого образцы из стали типа 30ХГСН2А были упрочнены дробью при различных режимах и затем подвергались нагрузке (ротационный изгиб). По результатам эксперимента получена регрессионная зависимость

величины усталостной прочности деталей из стали типа 30ХГСН2А от технологических факторов обработки дробью при различных режимах нагружения:

$$\begin{aligned} \text{Lg}N(\sigma_a, D, T, L) = & 8,123 + 5,434 \cdot \sigma_a - 5,737 \cdot \sigma_a^2 - 0,2724 \cdot D + \\ & + 0,464 \cdot \sigma_a \cdot D - 0,1923 \cdot D^2 - 0,05691 \cdot T - 0,04176 \cdot \sigma_a \cdot T + \\ & + 0,02255 \cdot D \cdot T + 0,0006838 \cdot T^2 + 0,006704 \cdot L - 0,02641 \cdot \sigma_a \cdot L - \\ & - 0,003795 \cdot D \cdot L + 0,0004336 \cdot T \cdot L + 9,27 \cdot 10^{-5} \cdot L^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_a – амплитудное напряжение процесса нагружения, ГПа.

Полученная модель является достаточно информативной ($F_{\text{инф}} = 4$) и адекватна экспериментальным данным при уровне доверительной вероятности 95 %. По результатам решения данной модели были получены графические зависимости величины усталостной прочности деталей от технологических факторов обработки дробью при различных режимах (рис. 3).

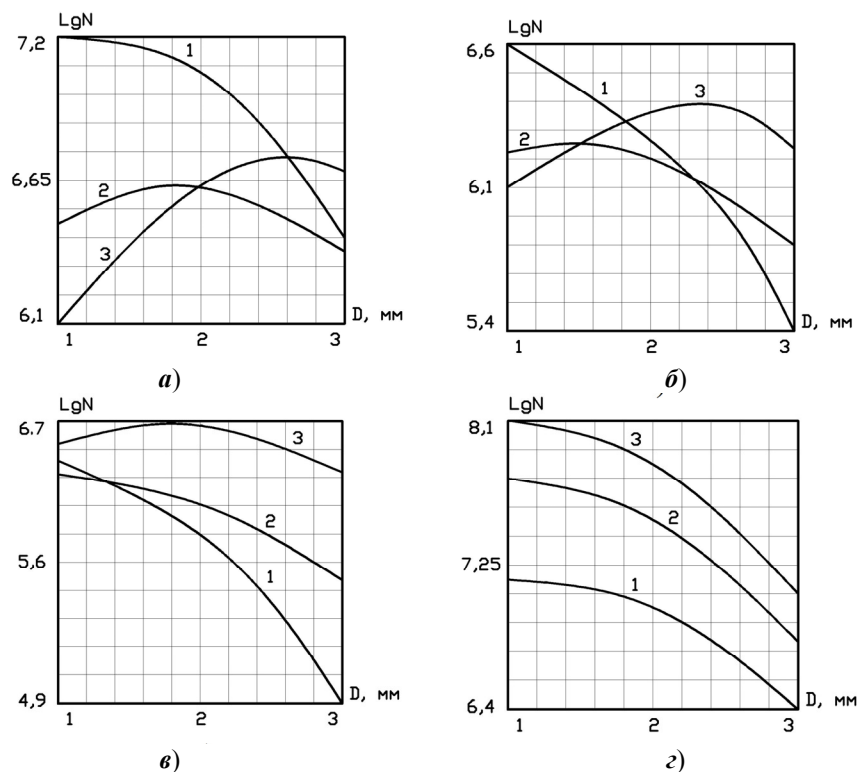


Рис. 3. Зависимость величины усталостной прочности деталей из стали типа 30ХГСН2А от технологических факторов обработки дробью:
 а – $L = 13 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; б – $L = 60 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; в – $L = 60 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
 1 – $T = 10$ мин; 2 – $T = 25$ мин; 3 – $T = 40$ мин; $\sigma_a = 1$ ГПа

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что с увеличением амплитудного напряжения (т.е. при ужесточении режима нагруже-

ния), а также при ужесточении режимов упрочнения происходит соответственный спад величины усталостной прочности деталей. Однако стоит отметить, что повышение интенсивности обработки благоприятно сказывается на усталостной характеристике материала, что является следствием более сплошного покрытия ударами дроби поверхности детали.

4. Определение оптимального уровня наработки для эффективного повышения ресурса

С целью прогнозирования ресурса работы изделий и определения уровня наработки, оптимального для замены или ремонта, необходима четкая оценка степени усталостных повреждений, возникающих в детали под воздействием циклически изменяющихся напряжений (более низких, чем предел прочности). Оценить степень накопления материалом усталостных повреждений возможно при использовании неразрушающих методов контроля. Основываясь на вышеуказанных рекомендациях по выбору оптимального режима обработки деталей, провели эксперимент, в ходе которого образцы из стали типа 30ХГСН2А подвергались упрочнению дробью при производстве и дальнейшему нагружению (ротационный изгиб) с величиной приложенной нагрузки $\sigma_a = 0,9$ ГПа. На различных стадиях нагружения образцы подвергались процедуре магнитошумового контроля посредством оценки числа выбросов ЭДС. По результатам эксперимента была составлена графическая зависимость относительного изменения средних параметров ЭДС от скачков Баркгаузена (СБ) от величины относительной наработки исследуемых образцов (рис. 4).

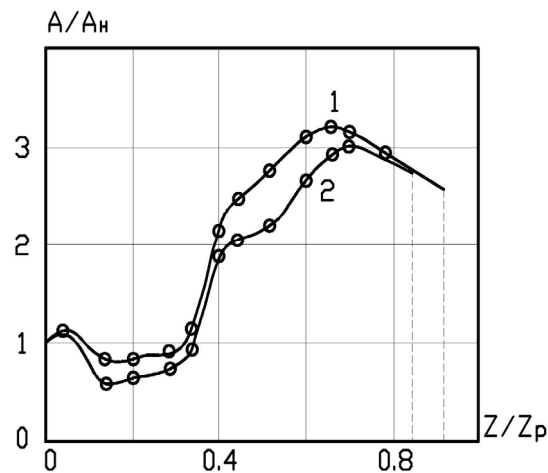


Рис. 4. Зависимость относительных параметров ЭДС от скачков Баркгаузена от величины относительной наработки:
 $1 - A = e_{cp}$; $2 - A = N_{cp}$ ($Z_p = 510000$ циклов)

График можно разбить на три условных участка:

1) $Z/Z_p = 0 \dots 0,15$ – участок неоднозначности, на котором наблюдается уменьшение значений параметров ЭДС от СБ, что может быть объяснено влиянием пластической деформации;

2) $Z / Z_p = 0,15 \dots 0,3$ – участок спуска и последующей стабилизации кривых, характеризующийся увеличением значений параметров ЭДС от СБ, вызванных свойствами циклически упрочняемой стали;

3) $Z / Z_p = 0,35 \dots 0,9$ – участок монотонного подъема кривых, вызванный лавинообразным увеличением фиксируемых параметров ЭДС от СБ. По всей видимости, на данном интервале наработки в изделии происходит процесс общего разупрочнения, характеризующийся накоплением необратимых усталостных повреждений.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод о высоком циклическом упрочнении деталей, изготовленных из стали типа 30ХГСН2А при относительной предварительной наработке $Z / Z_p = 0,25 \dots 0,4$, а также отметить влияние предварительного упрочнения ударными методами поверхностного пластического деформирования – их применение повышает степень циклического упрочнения стали. Данный эффект вызван в первую очередь образованием и развитием дислокационной структуры в материале при обработке методами ППД и в ходе дальнейшего нагружения.

Применение методов неразрушающего контроля позволило выявить оптимальный относительный уровень наработки, по достижении которого наблюдается наибольший эффект восстановления запаса усталостной прочности деталей – $Z / Z_p = 0,4$ (что составляет 250000–280000 циклов нагружения при напряжениях нагрузки $\sigma_a = 0,9$ ГПа).

5. Обеспечение выносливости деталей при восстановлении

Для оценки влияния технологических факторов обработки дробью на степень восстановления запаса усталостной прочности деталей при ремонте деталей был проведен многофакторный эксперимент, в ходе которого образцы из стали типа 30ХГСН2А подвергались предварительной обработке дробью по режимам, определенным из результатов исследований в п. 3 ($T = 1$ мин, $D = 1$ мм, $L = 13$ мм⁻² · с⁻¹), дальнейшему нагружению (пульсирующее растяжение, $\sigma_a = 1,3$ ГПа), повторному упрочнению дробью при различных режимах и окончательному нагружению вплоть до разрушения. По окончании эксперимента была составлена регрессионная модель (4) зависимости показателя усталостной прочности деталей от технологических факторов обработки дробью при повторном упрочнении после эксплуатации:

$$\begin{aligned} LgN(L, D, T) = & 4,346 + 0,001977 \cdot L - 2,193 \cdot 10^{-5} \cdot L^2 - 0,4078 \cdot D + \\ & + 0,001677 \cdot L \cdot D + 0,04155 \cdot D^2 + 0,1229 \cdot T - 0,0004771 \cdot L \cdot T + \\ & + 0,03076 \cdot D \cdot T - 0,02358 \cdot T^2 + 0,7448 \cdot Z / Z_p - 0,001878 \cdot L \cdot Z / Z_p + \\ & + 0,2319 \cdot D \cdot Z / Z_p - 0,2358 \cdot T \cdot Z / Z_p - 1,034 \cdot (Z / Z_p)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученная модель обладает высокой степенью информативности (коэффициент $F_{\text{инф}} = 4,2$) и адекватна экспериментальным данным при 95 % уровне доверительной вероятности, что подтверждает ее высокую прогно-

стическую способность. На основании регрессионной модели составлены графические зависимости (рис. 5, 6).

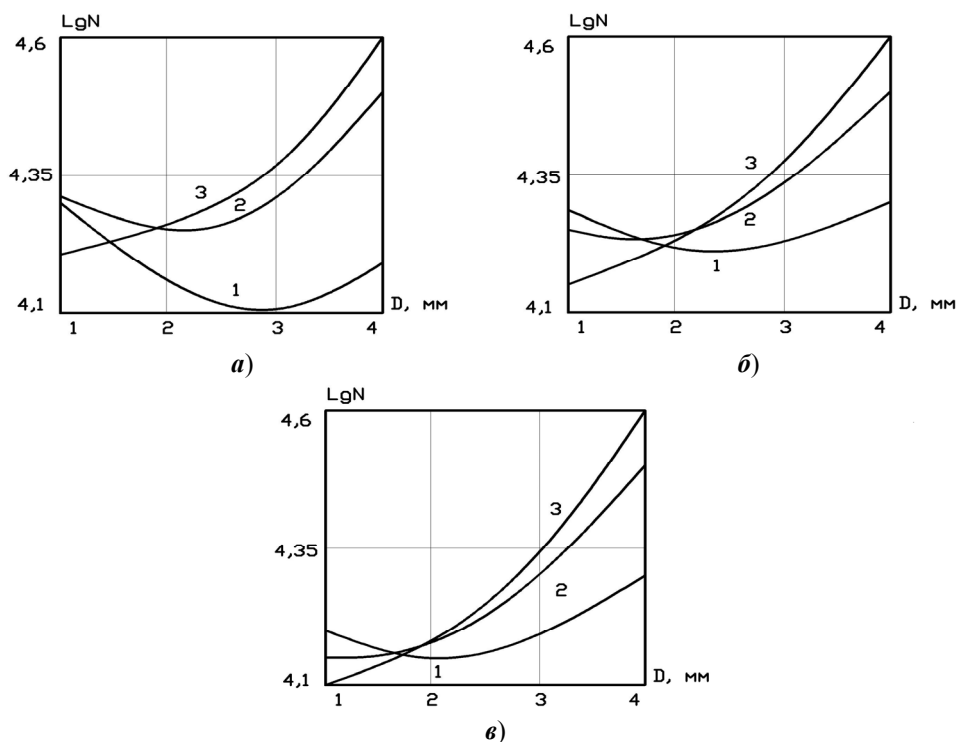


Рис. 5. Зависимость показателя усталостной прочности деталей от технологических факторов обработки дробью при повторном упрочнении после эксплуатации: *а* – $T = 1$ мин; *б* – $T = 2$ мин; *в* – $T = 3$ мин; $1 - L = 30 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $2 - L = 75 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; $3 - L = 120 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Анализ полученных зависимостей показал, что оптимальной величиной эксплуатации изделий, после которой наиболее эффективно повторное упрочнение, является уровень относительной наработки $Z / Z_p = 0,4$ (рис. 6), что подтверждает выводы, сделанные в п. 4.

Наибольшее влияние на показатель усталостной прочности детали после повторного упрочнения в ходе процедур восстановления ударными методами ППД оказывают диаметр дробы D и интенсивность обработки L , при этом время обработки практически не оказывает никакого воздействия.

В ходе повторной обработки после процесса эксплуатации ужесточение режимов упрочнения положительно влияет на эффект восстановления прочностных свойств деталей – увеличение диаметра дробы D до 4 мм и интенсивности обработки L до $120 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ позволяет повысить показатель усталостной прочности деталей на 12 %.

6. Технологические рекомендации по увеличению общего технического ресурса деталей при упрочнении дробью

С целью повышения общего технического ресурса деталей из высокопрочных сталей на основании вышеизложенного материала предлагаются

следующие рекомендации по упрочнению деталей дробью на этапах производства и восстановления:

1. На этапе производства:

- диаметр дробы – 4 мм;
- время обработки – 1 мин.;
- масса загружаемой дробы (для дробеметной машины) – 6 кг;
- давление воздуха (в пневмодинамическом устройстве) – 0,4 МПа.

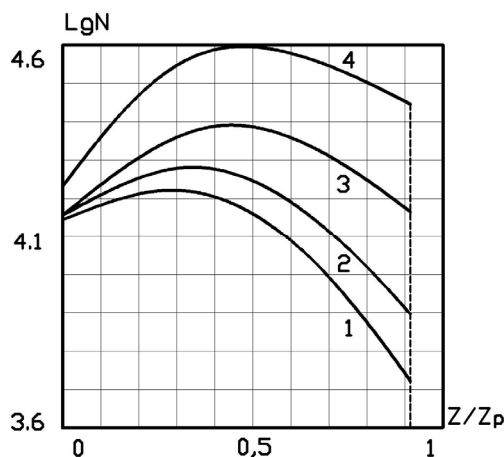


Рис. 6. Зависимость показателя усталостной прочности деталей от уровня относительной наработки при различных режимах повторного упрочнения:
1 – $D = 1$ мм; 2 – $D = 2$ мм; 3 – $D = 3$ мм; 4 – $D = 4$ мм ($T = 3$ мин)

2. На основании проведенных исследований, а также статистических данных предприятия по эксплуатации изделий проводить регламентные ремонтные работы по восстановлению деталей при уровне относительной наработки $Z / Z_p = 0,4$, что составляет 250000–280000 циклов нагружения (при напряжениях нагрузки $\sigma_a = 0,9$ ГПа).

3. На этапе восстановления:

- диаметр дробы – 1 мм;
- время обработки – 4 мин;
- масса загружаемой дробы (для дробеметной машины) – 4 кг;
- давление воздуха (в пневмодинамическом устройстве) – 0,2 МПа.

Обработка деталей с применением вышеуказанных рекомендаций позволяет повысить общий технический ресурс деталей на 20 %, что составляет 120000–150000 циклов при напряжениях нагрузки $\sigma_a = 0,9$ ГПа.

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

Заключение

Основным выводом данной работы является доказательство эффективности применения обработки ударными методами ППД деталей из высокопрочных сталей на стадиях производства и после эксплуатации. Доказано,

что применение рекомендованных режимов обработки и рекомендаций по величине доремонтного ресурса позволяет продлить общий технический ресурс деталей из высокопрочных сталей на 20 % (что составляет 120000–150000 циклов нагружения при напряжениях нагрузки $\sigma_a = 0,9$ ГПа).

Список литературы

1. Конструкционные материалы. Справочник / Б. Н. Арзамасов и др. ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1990. – 687 с.
2. **Житомирский, Г. И.** Конструкция самолетов : учеб. для авиац. специальностей вузов / Г. И. Житомирский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1995. – 415 с.
3. **Сулима, А. М.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 239 с.
4. **Балтер, М. А.** Упрочнение деталей машин / М. А. Балтер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
5. Технология упрочнения. Справочник / М. С. Поляк. – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 688 с.
6. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 299 с.

References

1. Arzamasov B. N., et al. *Konstruktsionnye materialy. Spravochnik* [Construction materials. Reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 687 p.
2. Zhitomirskiy G. I. *Konstruktsiya samoletov: ucheb. dlya aviats. spetsial'nostey vuzov* [Aircraft design: textbook for aviation majors at universities]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 415 p.
3. Sulima A. M., Shulov V. A., Yagodkin Yu. D. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin* [Surface layer and operating properties of machine components]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 239 p.
4. Balter M. A. *Uprochnenie detaley mashin* [Machine detail hardening]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 184 p.
5. Polyak M. S. *Tekhnologiya uprochneniya. Spravochnik* [Hardening technology: Reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 1995, vol. 2, 688 p.
6. Smelyanskiy V. M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of detail hardening by plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 299 p.

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 Engineering (20 Stromynka
street, Moscow, Russia)

УДК 621.7.09

Зык, Е. Н.

Влияние отделочно-упрочняющей обработки дробью на прочностные свойства и характеристики деталей из высокопрочных сталей при производстве и восстановлении / Е. Н. Зык, В. В. Плешаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 1 (37). – С. 138–148.