

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.7.015

doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-15-24

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ КЛАССА ВАЛОВ

Анатолий Васильевич Тотай<sup>1✉</sup>, Олег Николаевич Федонин<sup>2</sup>, Александр Владимирович Хандожко<sup>3</sup>, Дмитрий Иванович Петрешин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> totai\_av@mail.ru, orcid.org/0000-0003-4794-9881

<sup>2</sup> fedonin@mail.ru, orcid.org/0000-0002-3511-699X

<sup>3</sup> chandosh@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-0604-8537

<sup>4</sup> dipetreshin@yandex.ru, orcid.org/0000-0001-9472-2167

### Аннотация

В статье изложены теоретические основы и экспериментальный подход к обеспечению гигациклового усталости деталей класса валов при научно обоснованном подходе к проектированию операционных технологических процессов финишной стадии обработки. На основе фундаментальных положений теории пластической деформации металлов получены аналитические зависимости, связывающие силовые, температурные и скоростные факторы лезвийных и упрочняющих методов обработки на формирование параметров состояния поверхностного слоя, из которых наибольшее внимание уделено размеру зерна металла поверхностного слоя. Данный параметр в значительной степени определяет возможности сопротивления процессам усталостного разрушения при дислокационном механизме роста усталостных трещин.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность технологического управления коэффициентом интенсивности напряжений при циклических нагружениях за счет реализации определенных условий операционных технологи-

ческих процессов. В качестве методов обработки на финишной стадии технологического процесса использовались лезвийные инструменты из черной оксидной керамики и композитов, а также искусственные алмазы для выглаживания.

Для этих методов обработки экспериментально установлены возможности управления режимами как тонкого точения, так и алмазного выглаживания размером зерна поверхностного слоя деталей из закаленных среднеуглеродистых и легированных сталей. Получены экспериментальные зависимости предела выносливости образцов из указанных материалов в зависимости от размера зерна поверхностного слоя. На основе исследований зависимостей числа циклов до разрушения представлена реальная картина возможностей технологического обеспечения гигациклового усталости деталей класса валов из различных конструкционных материалов.

**Ключевые слова:** гигацикловая усталость, коэффициент, интенсивность, напряжение, размер, зерно, скорость деформации, точение, алмазное выглаживание, выносливость.

Ссылка для цитирования:

Тотай А.В. Технологическое обеспечение гигациклового усталости деталей класса валов / А.В. Тотай, О.Н. Федонин, А.В. Хандожко, Д.И. Петрешин // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 11. – С. 15-24. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-15-24.

Original article

Open Access Article

## TECHNOLOGICAL SUPPORT OF GIGACYCLE FATIGUE OF SHAFT PARTS

Anatoly Vasilyevich Totay<sup>1✉</sup>, Oleg Nikolaevich Fedonin<sup>2</sup>, Aleksandr Vladimirovich Khandozhko<sup>3</sup>, Dmitry Ivanovich Petreshin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> totai\_av@mail.ru, orcid.org/0000-0003-4794-9881

<sup>2</sup> fedonin@mail.ru, orcid.org/0000-0003-4794-9881

<sup>3</sup> chandosh@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-0604-8537

<sup>4</sup> dipetreshin@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4794-9881

## Abstract

The paper presents the theoretical foundations and an experimental approach to ensuring gigacycle fatigue of shaft parts with a scientifically based approach to the design of operational technological processes of the finishing machining stage. Based on the fundamental theoretical provisions of plastic deformation of metals, analytical dependences linking the force, temperature and speed factors of blade and hardening machining methods are received which influence the formation of the parameters of the surface layer state, and the greatest attention is paid to the grain size of the surface layer metal. This parameter largely determines the possibilities of resistance to fatigue fracture processes in the dislocation mechanism of fatigue crack growth.

The possibility of technological control of the stress intensity coefficient under cyclic loads due to the implementation of certain conditions of operational technological processes is theoretically substantiated

## Reference for citing:

Totay AV, Fedonin ON, Khandozhko AV, Petreshin DI. Technological support of gigacycle fatigue of shaft parts. *Transport Engineering*. 2023; 11:15-24. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-15-24.

## Введение

Современный этап развития техники характеризуется повышенными требованиями к надежности продукции машиностроения, определяющей ее конкурентоспособность.

Одной из основных причин окончания физического срока эксплуатации изделия, наряду с износом, является разрушение элементов конструкций по причине усталостных явлений в конструкционных материалах. Интервал существования гигацикловой усталости определяется от  $10^8$  до  $10^{10}$  и более циклов нагружения [1].

В большинстве машин, механизмов и технологической оснастки детали класса валов являются наиболее нагруженными элементами, определяющими ресурс всего изделия. Увеличение срока службы любого элемента конструкции может быть обеспечено по трем основным вариантам. Первый вариант связан с увеличением разме-

## Теоретический подход

Ряд исследований [2, 3] для прогнозирования физических параметров, обеспечивающих существование нераспространяющихся усталостных трещин, базируются на расчетах коэффициента интенсивности напряжений, определяемый по зависимости

and experimentally confirmed. Blade tools made of black oxide ceramics and composites, as well as artificial diamonds for smoothing, are used as machining methods at the final stage of the technological process.

For these machining methods, the possibilities of controlling the modes of both fine turning and diamond smoothing by the grain size of the surface layer of parts made of hardened medium-carbon and alloy steels are experimentally found out. Experimental dependences of the endurance limit of samples from these materials depending on the grain size of the surface layer are obtained. Based on studies of the dependences of the number of cycles before destruction, the possibilities of technological support for gigacycle fatigue of shaft parts made of various structural materials are presented.

**Keywords:** gigacycle fatigue, coefficient, intensity, stress, size, grain, strain rate, turning, diamond smoothing, endurance.

ров детали и, следовательно, всего изделия, что является неприемлемым по причине роста себестоимости, материалоемкости и снижением конкурентоспособности.

Второй вариант предполагает совершенствование механических свойств конструкционных материалов и является сферой научных и прикладных работ металлургов и материаловедов. В настоящее время данный вариант можно считать основным.

И третий вариант заключается в повышении надежности и долговечности деталей машин на стадии изготовления, т.е. технологическими методами путем глубокого изучения влияния инструментального обеспечения и режимов обработки на состояние поверхностного слоя и его способность выдерживать эксплуатационные нагрузки.

$$k = \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (1)$$

где  $l = nd$  – глубина трещины, превышающая размер зерна  $d$ ,  $1 < n < 5$ ;  $\sigma$  – приложенное напряжение.

Очевидно, что для конкретных условий эксплуатации существует так называ-

емое пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений, ниже которого роста усталостной трещины не происходит. Другими словами обеспечить требуемый коэффициент интенсивности напряжений при заданном эксплуатационном условии можно лишь за счет минимального размера зерна в поверхностном слое конструкционного материала гладкого цилиндрического образца (без конструктивных концентраторов напряжений).

Размер зерна в поверхностном слое напрямую зависит от фактического значения напряжения текучести, действующего в процессе технологического воздействия.

Фактический размер зерна можно определить с достаточной для практики точностью, используя известное соотношение Холла-Петча

$$d = \left( \frac{c}{\sigma'_T - \sigma_T} \right)^2, \quad (2)$$

где  $c$  – константа для материала детали;  $\sigma'_T$  – фактическое значение предела текучести при обработке;  $\sigma_T$  – табличное значение предела текучести.

Таким образом, воздействовать на размер зерна приповерхностного слоя технологическими методами возможно лишь

связав напряжение текучести в момент обработки с конкретными физическими факторами в зоне контакта инструмент-заготовка.

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что в процессе механической обработки деформационные и температурные факторы изменяют физико-механические свойства поверхностного слоя металла. К этим свойствам, прежде всего, относятся следующие: предел текучести, хрупкость, внутреннее трение и плотность материала.

Это положение создает необходимость учета полного комплекса факторов, характеризующих конкретный метод обработки, и получение на основе теории пластических деформаций металлов объективной картины формирования параметров поверхностного слоя.

В ряде случаев для практических расчетов при определении динамического напряжения текучести используют выражение [4]

$$\sigma'_T = \psi \sigma_T, \quad (3)$$

где  $\psi$  – коэффициент, зависящий от относительных скорости и температуры деформации (табл. 1).

Таблица 1

Значение коэффициента  $\psi$  в зависимости от скорости и температуры деформации

Table 1

*Value of the  $\psi$  coefficient depending on the strain speed and temperature*

$\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$	$\theta_{\text{деф}}/\theta_{\text{пл}} < 0,3$	$\theta_{\text{деф}}/\theta_{\text{пл}} = 0,3 - 0,4$	$\theta_{\text{деф}}/\theta_{\text{пл}} = 0,6 - 0,7$	$\theta_{\text{деф}}/\theta_{\text{пл}} > 0,7$
10	1,05 – 1,1	1,1 – 1,15	1,15 – 1,3	1,3 – 1,5
100	1,1 – 1,22	1,22 – 1,32	1,32 – 1,7	1,7 – 2,25
1000	1,16 – 1,34	1,34 – 1,52	1,52 – 2,2	2,2 – 3,4

В табл. 1  $\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$  – отношение скорости деформации в процессе обработки к скорости в процессе испытаний,  $\theta_{\text{деф}}$  и  $\theta_{\text{пл}}$  соответственно – температура деформации и температура плавления обрабатываемого материала.

Многочисленные исследования процессов механической обработки показывают, что скорости пластических деформаций металлов находятся в пределах  $10^3 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$  и более. Так, например, скорость деформации сталей при точении твердо-

сплавными резцами порядка  $10^3 \text{ с}^{-1}$  соответствует скоростям резания 40 – 50 м/мин.

Скорость же деформации при статических испытаниях не превышает  $10^{-3} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , что позволяет считать резание или упрочнение процессом высокоскоростного деформирования и, следовательно, значения коэффициента  $\psi$  в табл. 1 могут выбираться для соотношения  $\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$   $10^3$  и более.

Что касается температуры деформирования, то в зависимости от метода обра-

ботки и его условий коэффициент  $\psi$  может принимать значения в широком диапазоне (от 1,1 до 3,5).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в процессе механической обработки упругопластические свойства конструкционных материалов могут отличаться от табличных значений в несколько раз. Кроме того, если принять во внимание связь твердости деформируемого тела и интенсивность напряжений в процессе обработки, то станут очевидными резервы в технологическом управлении параметрами состояния поверхностного слоя (ПСПС).

Для применения этих теоретических положений в прикладных расчетах необходимо учитывать два основных момента. Первый касается фактического значения предела текучести при действующей скорости деформации, второй фактор характеризует напряжение текучести в зоне обработки материала повышенной пластичности вследствие действующих температур в контакте инструмент-заготовка.

Для удобства использования количественного влияния этих положений на основании данных таблицы 1 предложена линейная зависимость

$$\psi = k_{\psi} + m_{\psi} \frac{\theta_{\text{деф}}}{\theta_{\text{пл}}}. \quad (4)$$

При  $\theta_{\text{деф}}/\theta_{\text{пл}} \leq 0,3$   $k_{\psi} = 1$ ;  $m_{\psi} = 1,5$ ; при  $\theta_{\text{деф}}/\theta_{\text{пл}} \geq 0,3$   $k_{\psi} = 0,35$ ;  $m_{\psi} = 2,8$ .

Уравнение (4) учитывает влияние скорости деформации на величину  $\sigma_T$ .

Изменение пластических свойств обрабатываемого материала можно оценить с помощью зависимости Н.С. Курнакова [4]

$$\sigma'_T = \sigma_T \left[ 1 - e^{-n_T(\theta_{\text{деф}} - \theta_{\text{пл}})} \right], \quad (5)$$

где  $n_T$  – константа, зависящая от марки и состояния материала; для:

- нормализованных среднеуглеродистых сталей  $n_T = 3 \cdot 10^{-3}$ ;
- закаленных среднеуглеродистых сталей  $n_T = 1,2 \cdot 10^{-3}$ ;
- закаленных легированных сталей  $n_T = 1,4 \cdot 10^{-3}$ ;
- легированных чугунов с ферритной структурой  $n_T = 1,7 \cdot 10^{-3}$ ;
- с перлитной структурой  $n_T = 1,5 \cdot 10^{-4}$ .

Таким образом, комплексный учет физических факторов обработки позволяет получить зависимость предела текучести следующего вида

$$\sigma'_T = \sigma_T \left( k_{\psi} + m_{\psi} \frac{\theta_{\text{деф}}}{\theta_{\text{пл}}} \right) \left[ 1 - e^{-n_T(\theta_{\text{деф}} - \theta_{\text{пл}})} \right]. \quad (6)$$

Решая совместно уравнение (2) и (6) относительно  $d$ , получим:

$$d = \left\{ c / \sigma_T \left[ \left( k_{\psi} + m_{\psi} \frac{\theta_{\text{деф}}}{\theta_{\text{пл}}} \right) \left( 1 - e^{-n_T(\theta_{\text{деф}} - \theta_{\text{пл}})} \right) - 1 \right] \right\}^2. \quad (7)$$

Аналитическое распределение температуры по глубине поверхностного слоя при технологическом воздействии является чрезвычайно сложной задачей, связанной с установлением теплофизической модели процесса, определением различных констант и т.д.

Для описания характера распределения тепла в объеме твердого тела можно воспользоваться [5, 6] интегралом вероятности

$$v_T = \text{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{F_0 h}} \right), \quad (8)$$

где  $v_T$  – относительная избыточная температура, равная отношению

$$v_T = \frac{\theta_k - \theta_h}{\theta_k - \theta_0}. \quad (9)$$

Здесь  $\theta_k$  – температура в контакте «инструмент-заготовка»,  $\theta_h$  – температура на глубине  $h$ ,  $\theta_0$  – температура окружающей среды.

Выражение под корнем представляет собой критерий Фурье и определяется:

$$F_0 h = \frac{a\tau}{h^2}, \quad (10)$$

где  $a$  – коэффициент температуропровод-

ности материала заготовки,  $m^2/c$ ;  $\tau$  – время действия теплового источника, с;  $h$  – расстояние от поверхности, м.

Решая совместно уравнения (8) и (9) относительно  $\theta_h$ , получим

$$\theta_h = \theta_k - \operatorname{erf}\left(\frac{h}{2\sqrt{a\tau}}\right)(\theta_k - \theta_0). \quad (11)$$

Или, пренебрегая  $\theta_0$ , будем иметь

$$\theta_h = \theta_k \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{h}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right]. \quad (12)$$

Контактная температура  $\theta_k$  расчи-

## Эксперимент

Экспериментальное подтверждение влияния методов и условий технологических операций проводилось при чистовом точении и алмазном выглаживании. В обоих случаях в качестве материалов образцов служили закаленная сталь 45 и закаленная сталь 65Г. Сталь 45 обрабатывалась резцами из черной оксидной керамики ВОК-60, а сталь 65Г резцами из композита 10. Определение среднего размера зерна поверхностного слоя проводилось по ГОСТ 5639-82 на металломикроскопе МИМ-8 [8].

Результаты исследований представлены на рис. 1 в полулогарифмической сетке.

Анализ графических зависимостей при обработке обоих материалов носит качественно схожий характер. А именно: с ростом скорости точения наблюдается рост размера зерна, что можно объяснить как уменьшением времени воздействия силовых факторов на обрабатываемую поверхность, так и уменьшением сил резания при высоких скоростях точения. Увеличение глубины резания, подачи и радиуса при вершине резца способствует уменьшению среднего размера зерен поверхностного слоя, что объясняется увеличением силового воздействия. Экспериментальные зависимости, полученные при исследовании процесса алмазного выглаживания, даны на рис. 2.

Радиус рабочей части индектора при обработке образцов из стали 45 и 65Г равнялся 1,5 мм. Характерной особенностью алмазного выглаживания при фор-

тывается по имеющимся многочисленным зависимостям для лезвийных, алмазно-абразивных и упрочняющих методов обработки.

Для практических расчетов температуры деформации поверхностного слоя  $\theta_{\text{деф}}$  можно принимать:

– для точения и выглаживания  $\theta_{\text{деф}} = 0,9\theta_k$ ;

– для алмазно-абразивных методов  $\theta_{\text{деф}} = 0,7\theta_k$ .

мировании текстуры является наличие более мелкого зерна, что объясняется самой сутью этого метода обработки, связанного с затратой практически всей энергии процесса на пластическое деформирование металла поверхностного слоя.

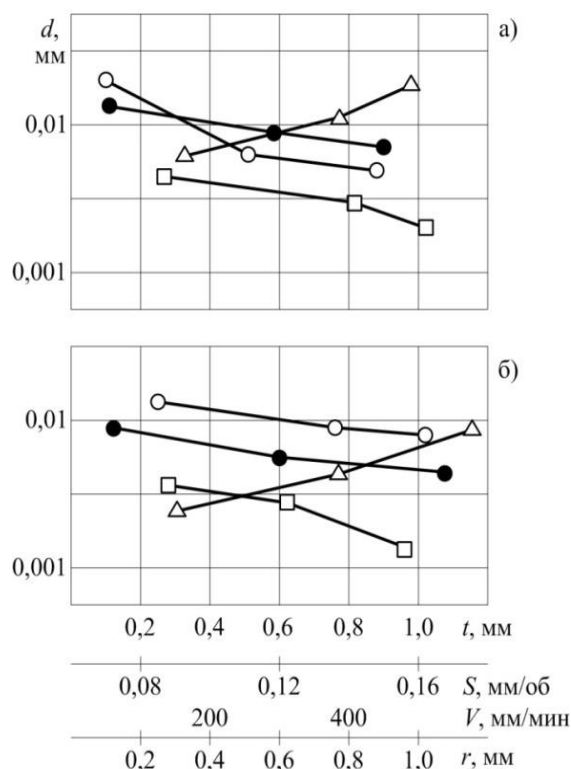


Рис. 1. Влияние факторов чистового точения на средний размер зерна поверхностного слоя: а – сталь 45 (HRC 40...44); б – сталь 65Г (HRC 60...62);  $\circ$  –  $t$ ;  $\bullet$  –  $S$ ;  $\triangle$  –  $V$ ;  $\square$  –  $r$

Fig. 1. Effect of finishing turning factors on the average grain size of the surface layer: a – steel 45 (HRC 40...44); b – steel 65G (HRC 60...62);  $\circ$  –  $t$ ;  $\bullet$  –  $S$ ;  $\triangle$  –  $V$ ;  $\square$  –  $r$

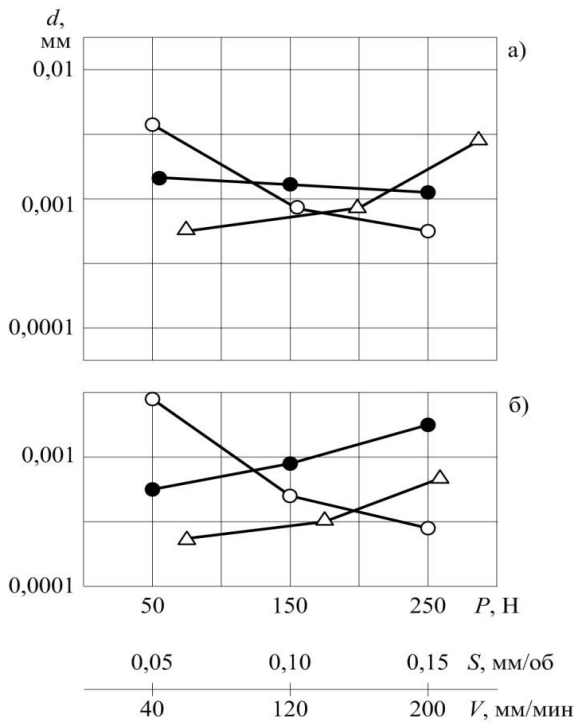


Рис. 2. Влияние факторов алмазного выглаживания на средний размер зерна поверхностного слоя:  
 а – сталь 45 (HRC 40...44); б – сталь 65Г (HRC 60...62); ○—○— P; ●—●— S; △—△— V  
 Fig. 2. Influence of diamond smoothing factors on the average grain size of the surface layer:  
 a – steel 45 (HRC 40...44); b – 65G steel (HRC 60...62); ○—○— P; ●—●— S; △—△— V

Для экспериментального подтверждения влияния размера зерна на критическое число циклов образцов до разрушения проведены ускоренные испытания по методу, рекомендованному ГОСТом 19533-74. В качестве финишного метода обработки использовалось алмазное выглаживание, обеспечивающее получение в поверхностном слое стальных образцов наиболее мелких зерен и позволяющее наглядно проследить исследуемую зависимость как на нормализованных, так и на закаленных сталях.

На рис. 3 приведены результаты экспериментов, из которых наглядно прослеживается тенденция увеличения предела выносливости у материалов с наименьшими размерами зерен в поверхностном слое.

Наибольшие значения предела выносливости, как и следовало ожидать, наблюдаются у образцов из закаленной стали 65Г, что объясняется ее высокой твердостью и значительными усилиями в процессе алмазного выглаживания и интенсивного дробления зерен поверхностного слоя.

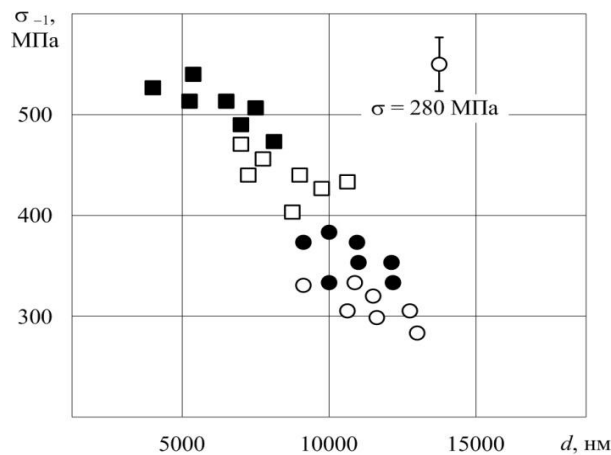


Рис. 3. Зависимость предела выносливости от среднего размера зерна поверхностного слоя:  
 ○ – сталь 45 нормализованная; ● – сталь 45 закаленная;  
 □ – сталь 65Г нормализованная; ■ – сталь 65Г закаленная  
 Fig. 3. Dependence of endurance limit on average surface layer grain size: ○ – normalized steel 45; ● – hardened steel 45;  
 □ – steel 65G normalized; ■ – steel 65G hardened

Минимальные размеры зерен, как следует из формулы (1), обеспечивают небольшие значения коэффициента интен-

сивности напряжений и увеличивают ресурс эксплуатации конструкционного материала.

Для исследования материалов получены эмпирические зависимости, связывающие размер зерна поверхностного слоя с величиной предела выносливости.

Формула имеет следующий вид:

$$\sigma_{-1} = a - kd, \quad (13)$$

где  $a$  и  $k$  – постоянные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Значения констант в уравнении (13)

Table 2

Constant values in equation (13)

Константы	Материал	$a$	$k$
Сталь 45 нормализованная		612	0,018
Сталь 45 закаленная		493	0,012
Сталь 65Г нормализованная		428	0,013
Сталь 65Г закаленная		412	0,009

### Прикладные результаты

Как показывает многолетняя практика конструкторского и технологического обеспечения долговечности деталей машин, эксплуатируемых в условиях циклических нагрузений, для прикладных задач наиболее информативным параметром является число циклов до разрушения  $N$ . Так, для тех же образцов на рис. 4 построена диаграмма влияния марки и состояния конструкционного материала на среднее значение числа циклов до разрушения.

Анализируя представленные данные можно убедиться, что до зоны гигацикловой усталости уверенно «дотягивают» лишь образцы из стали 65Г, что объясняется значительными величинами пределов выносливости, так и минимальными значениями размеров зерен поверхностного слоя, что обеспечивает эффективное торможение микротрещин границами зерен, которых тем больше в единичном объеме, тем меньше размер зерен.

Рядом авторов [7] получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитывать значения размеров зерен поверхностного слоя, в которых не может развиваться усталостная трещина критического размера  $d_k$ . Результаты, полученные по формуле (14), дают величины критиче-

ских размеров зерен порядка нескольких тысяч нанометров, что чаще всего характеризует микроструктуру сложных по составу композиционных материалов.

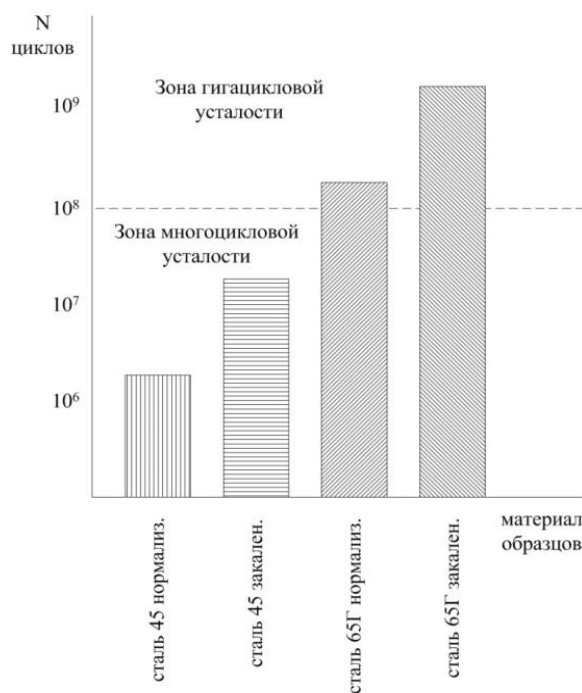


Рис. 4. Результаты испытаний на усталостную прочность до разрушения

Fig. 4. Fatigue test results before failure

$$d_k = \frac{0,06bE^2}{\sigma_T^2(1-\mu) \left\{ 1 + 0,4(1+\mu) \ln \left[ \frac{76(1-\mu^2)\sigma_T}{E} \right] \right\}}, \quad (14)$$

где  $b$  – вектор Бюргера,  $E$ ;  $\sigma_T$  и  $\mu$  – соответственно модуль упругости, предел те-

кучности и коэффициент Пуассона конструкционного материала.

Согласно ГОСТу [8] все возможные размеры зерен сталей и сплавов разбиты на диапазоны, каждому из которых присвоен номер  $G$  от  $-3$  до  $14$  (всего  $18$ ). Например, для номеров  $13$  и  $14$  средние размеры зерен  $d_m$  равняются  $0,0039$  мм и  $0,0027$  мм (не более), а их количество в  $1 \text{ мм}^3$  соответственно  $16777216$  и  $47449064$  шт. Данным стандартом руководствуются металлурги, материаловеды и специалисты по надежности, но, практически, не используют технологи. Очевидно, что технологическое воздействие на материал неизбежно изменит картину зернистости и скажется на различных эксплуатационных свойствах. Причем, комплексное воздействие силовых, температурных и скоростных факторов различных методов обработки

будет оказывать влияние на окончательное состояние материала поверхностного слоя путем проявления механизма технологической наследственности, как минимум, при реализации чистового и финишного этапа технологического процесса.

Как видно из анализа уравнения (7) технология со своим многообразием действующих физических процессов может довольно существенно повлиять на величину зерна поверхностного слоя как в сторону его уменьшения, так и способствовать его увеличению. Для увеличения вероятности обеспечения пределов выносливости, характеризующих зону гигацикловой усталости, необходимо технологическим путем создать условия выполнения неравенства (15).

$$\left\{ \frac{c}{\sigma_T \left[ \left( k_{\psi} + m_{\psi} \frac{\theta_{\text{деф}}}{\theta_{\text{пл}}} \right) \left( 1 - e^{-n_T(\theta_{\text{деф}} - \theta_{\text{пл}})} \right) - 1 \right]} \right\}^2 \leq \frac{0,06bE^2}{\sigma_T^2 (1-\mu) \left\{ 1 + 0,4(1+\mu) \ln \left[ \frac{76(1-\mu^2)\sigma_T}{E} \right] \right\}} \quad (15)$$

Анализируя приведенное неравенство для различных методов обработки, можно установить допустимые значения температур в зоне обработки, обеспечивающие условия существования нераспространяющихся усталостных трещин. Для более объективной оценки возможности металла к сопротивлению усталости большинство исследователей ориентируются

не только на размер зерна поверхностного слоя, но и на такую интегральную характеристику, как размах коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$ .

Табл. 3 иллюстрирует связь между средним размером зерна и величиной  $\Delta K$  для лезвийного и упрочняющего методов.

Таблица 3  
Зависимость размах коэффициента интенсивности напряжений и среднего размера зерна поверхностного слоя от скорости резания на финишной операции

Table 3

*Dependence of stress intensity factor span and average size grains of the surface layer from the cutting speed at the finishing operation*

Материал образца	Тонкое точение			Алмазное выглаживание		
	Скорость резания, м/мин			Скорость выглаживания, м/мин		
	83	147	224	64	111	172
Сталь 45 закаленная	Размах коэффициента интенсивности напряжений, $\Delta K$ , МПа*м <sup>1/2</sup>					
	4,7	4,9	5,4	3,8	3,9	4,2
	Средний размер зерна поверхностного слоя $d_m$ , мкм					
	7,4	12,6	29,1	5,6	11,3	19,6
Сталь 65Г закаленная	Размах коэффициента интенсивности напряжений, $\Delta K$ , МПа*м <sup>1/2</sup>					
	4,2	4,4	4,8	3,3	3,6	4,1
	Средний размер зерна поверхностного слоя $d_m$ , мкм					
	5,9	9,7	25,0	4,8	8,4	13,7



## Заключение

Приведенные данные говорят о возможном обеспечении гигацикловой усталости деталей класса валов из преимущественно легированных сталей, закаливаемых до твердости порядка 60...64 HRC при финишных методах обработки с невысокими скоростями обработки [5, 9], что в ряде случаев может вступить в противоре-

чие с обеспечением определенного уровня производительности обработки.

В данных ситуациях технолог неизбежно должен будет учитывать как технические, так и экономические критерии проектируемых технологических процессов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Терентьев В.Ф. Кораблева С.А. Усталость металлов : монография. Москва : Наука, 2015. 484 с.
2. Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: монография. Москва : Металлургия, 1989. 576 с.
3. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины: монография. Москва : Машиностроение, 1982. 171 с.
4. Теория пластических деформаций металлов: монография / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров [и др.]. Москва : Машиностроение, 1983. 598 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механи-

ческой обработки материалов: монография. Москва : Машиностроение, 1981. 279 с.

6. Тотай А.В. Теория и практика технологического обеспечения усталостной прочности деталей машин. // Научные технологии в машиностроении. 2018. №10. С. 38-42.
7. Бондаренко В.П., Халепа А.П. Высокопрочные карбидохромовые твердые сплавы. // Инструментальный мир. 1998. № 3. С. 40-44.
8. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Москва : Издательство стандартов. 2003.
9. Торбило В.М. Алмазное выглаживание: монография. Москва : Машиностроение, 1972. 105 с.

## REFERENCES

1. Terentyev VF, Korableva SA. Fatigue of metals: monograph. Moscow: Nauka; 2015.
2. Herzberg RV. Deformation and fracture mechanics of structural materials: monograph. Moscow: Metallurgiya; 1989.
3. Kudryavtsev PI. Non-spreading fatigue cracks: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 1982.
4. Unksov EP, Johnson W, Kolmogorov VL. Theory of plastic deformations of metals: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 1983.
5. Reznikov AN. Thermophysics of processes of mechanical processing of materials: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 1981.

6. Totay AV. Theory and practice of fatigue strength technological support in machinery. // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2018;10:38-42.
7. Bondarenko VP, Halepa AP. High-strength carbidechrome hard alloys. // Instrumentalny Mir. 1998;3:40-44.
8. GOST 5639-82. Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 2003.
9. Torbilo VM. Diamond smoothing: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 1972.

## Информация об авторах:

**Тотай Анатолий Васильевич** – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. +7-910-743-51-85, e-mail: totai\_av@mail.ru, Author-ID-РИНЦ: 453423.

**Федонин Олег Николаевич** – профессор, доктор технических наук, ректор ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», тел. +7-910-743-51-85, e-mail: fedonin@mail.ru; Author-ID-РИНЦ: 453423.

**Хандожко Александр Владимирович** – доцент,

доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, тел. +7-929-023-01-23, e-mail: chandosh@yandex.ru; Author-ID-РИНЦ: 453423.

**Петрешин Дмитрий Иванович** – доцент, доктор технических наук, директор учебно-научного технологического института, профессор кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета, тел. +7-910-293-62-96, e-mail: di-petreshin@yandex.ru; Author-ID-РИНЦ: 453423.

**Totay Anatoly Vasilyevich** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University; phone: +7-910-743-51-85, e-mail: totai\_av@mail.ru, Author-ID-RSCI: 453423.

**Fedonin Oleg Nikolaevich** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Rector of Bryansk State Technical University; phone: +7-910-743-51-85, e-mail: fedonin@mail.ru; Author-ID-RSCI: 453423.

**Khandozhko Aleksandr Vladimirovich** – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of

the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University; phone: +7-929-023-01-23, e-mail: chan-dosh@yandex.ru; Author-ID-RSCI: 453423.

**Petreshin Dmitry Ivanovich** – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Director of the Educational and Scientific Technological Institute, Professor of the Department of Automated Technological Systems at Bryansk State Technical University; phone: +7-910-293-62-96, e-mail: dipet-reshin@yandex.ru; Author-ID-RSCI: 453423.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 12.10.2023; одобрена после рецензирования 23.10.2023; принята к публикации 27.10.2023. Рецензент – Киричек А.В., доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 12.10.2023; approved after review on 23.10.2023; accepted for publication on 27.10.2023. The reviewer is Kirichek A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Long-term Development at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**