

2. Fedonin, O.N. Corrosion resistance support in machinery at machining // *Metal Machining*. – 2004. – No. 3, - pp. 22 – 25.

3. Fedonin, O.N. Corrosion resistance support in machinery at corrosion inhibitor use // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2004. – No. 7. – pp. 12-15.

4. Fedonin, O.N. Corrosion resistance support in machinery at non-metal coatings // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2004. – No.9. – pp. 8-14.

5. Fedonin, O.N. Technological support and corrosion resistance increase in machinery // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2012. No. 2(8). pp. 3-10.

Рецензент д.т.н. Д.И. Петрешин

УДК 621.7.015

DOI: 10.30987/article_5bb4b1fb31e9c9.01589077

А.В. Тотай, д.т.н.,
(ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет,
Россия, 241035, г. Брянск, б-р 50-летия Октября, д. 7)
E-mail: totai_av@mail.ru

Теория и практика технологического обеспечения усталостной прочности деталей машин

На основе теории пластической деформации металлов установлены аналитические связи между скоростными, силовыми и температурными факторами механической обработки с параметрами поверхностного слоя деталей машин, определяющими их сопротивление усталостным разрушениям. В статье рассмотрены варианты технологического обеспечения сопротивления усталости путем управления такими параметрами состояния поверхностного слоя деталей машин, как плотность дислокаций и размер зерна конструкционного материала.

Ключевые слова: сопротивление усталости; плотность дислокаций; размер зерна; технологические факторы; чистовое точение; алмазное выглаживание.

A.V. Totay, Dr. Sc. Tech.
(FSBEI HE Bryansk State Technical University, 7, October 50-th Anniversary, Bryansk, 241035 Russia)

Theory and practice of fatigue strength technological support in machinery

On a basis of the theory of metal plastic deformation there are determined analytical ties between speed, power and temperature factors of machining with parameters of machinery surface layers defining their resistance to fatigue destructions. The paper reports the technological assurance options for resistance to fatigue by means of the control of such surface layer state parameters of machinery as dislocations density and a grain size of structure material.

Keywords: fatigue resistance; dislocation density; grain size; technological factors; finish turning; diamond smoothing.

Стойкость конструкционных материалов против усталостного разрушения является одним из важнейших факторов, влияющих на надежность и долговечность машин. Явление усталостного разрушения деталей связано с пластической деформацией, при которой происходит реализация различных механизмов взаимодействия дислокаций, скопление вакансий и зарождение усталостной трещины.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования убедительно свидетельствуют о зарождении усталостных трещин в поверхностном слое и о первостепенном влиянии физических параметров состояния металла поверхностного слоя на условия их зарождения и скорость роста. Достаточно глубоко изучено влияние наклепа и техноло-

гических остаточных напряжений на усталостную прочность и разработаны рекомендации по технологическому обеспечению этих физических параметров.

Однако решать данную проблему на современном этапе лишь средствами механики сплошных сред означало бы не использование больших резервов в повышении усталостной прочности деталей машин. Речь идет о доказанном доминирующем влиянии на предел выносливости такого физического параметра, как плотность дислокаций [1]. Установлено, что зарождение усталостных трещин в структуре металла наблюдается при плотности дислокаций 10^{10} см⁻² при исходной плотности 10^8 см⁻². Но плотность дислокаций порядка 10^8 см⁻² имеет место обычно только у ото-

жженных сталей, которые редко являются ответственными элементами конструкций, что подтверждает мысль о необходимости исследования этого параметра после различных технологических операций.

Из теории пластических деформаций металлов известно соотношение Д. Тейлора:

$$\sigma = Gb \cdot \sqrt{\rho} / 2\pi, \quad (1)$$

где σ – действующее напряжение; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргера; ρ – плотность дислокаций.

Из выражения (1) $\rho = (2\pi\sigma / Gb)^2$. (2)

Очевидно, что до разрушения поликристаллического материала или, другими словами, до достижения определенного критического значения плотности дислокаций эти дефекты в поверхностном слое накапливаются на протяжении трех стадий: 1) металлургическо-термической, 2) технологической и 3) эксплуатационной. Таким образом:

$$\rho = \rho_{MT} + \rho_{TX} + \rho_{Э}, \quad (3)$$

Введя в уравнение (2) вместо модуля сдвига модуль упругости E из соотношения $G = E / 2(1 + \mu)$, где μ – коэффициент Пуассона, а также коэффициент ψ , учитывающий [2, 3, 4] температуру и скорость деформации металла поверхностного слоя, получим:

$$\rho = \rho_{исх} + \left[\frac{4\pi}{b} (1 + \mu) \right]^2 \left\{ E^{-2} \left[\left(\frac{\sigma_{TX}}{\psi_{TX}} \right)^2 + N \left(\frac{\sigma_{Э}}{\psi_{Э}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (4)$$

В зависимости (4) σ_{TX} и $\sigma_{Э}$ – технологические и эксплуатационные напряжения с соответствующими коэффициентами; N – число циклов действия напряжений в процессе эксплуатации.

Из уравнения (4) можно определить число циклов N до разрушения

$$N = \frac{\rho - \left\{ \rho_{исх} + \left[\frac{4\pi(1 + \mu)}{b} \right]^2 \left(\frac{\sigma_{TX}}{\psi_{TX} E} \right)^2 \right\}}{\left[\frac{4\pi(1 + \mu)}{b} \right]^2 \left(\frac{\sigma_{Э}}{\psi_{Э} E} \right)^2}, \quad (5)$$

или, обозначив $\frac{4\pi(1 + \mu)}{bE}$ через $\omega = \text{const}$

для данного материала, получим

$$N = \frac{\rho - \left[\rho_{исх} + \omega^2 \left(\frac{\sigma_{TX}}{\psi_{TX} E} \right)^2 \right]}{\omega^2 \left(\frac{\sigma_{Э}}{\psi_{Э} E} \right)^2}. \quad (6)$$

Величину критической плотности дислокаций с достаточной для практических задач точностью можно рассчитывать по зависимости [5]:

$$\rho = (2\pi\kappa_p \sigma_b / Gb)^2, \quad \text{где } \sigma_b \text{ – предел прочности,} \\ \kappa_p = 0,5 \dots 0,7. \quad (7)$$

Исследование дислокационной структуры поверхностного слоя является достаточно

сложной и трудоемкой задачей, требующей наличие дорогостоящего оборудования. В ряде случаев можно воспользоваться неизбежной связью между такими параметрами как плотность дислокаций и размер зерна приповерхностного слоя d .

Теоретически эту связь можно получить на основе связи предела текучести с плотностью дислокаций

$$\sigma_T'' = \sigma_T + \alpha_p Gb \sqrt{\rho}, \quad (8)$$

где σ_T'' – предел текучести материала с учетом скоростных и температурных факторов обработки; α_p – коэффициент, зависящий от природы металла, его кристаллической решетки и структуры.

Фактическое значение предела текучести можно определить по уравнению Холла-Петча:

$$\sigma_T = \sigma_T + cd^{-0,5}. \quad (9)$$

Решая совместно уравнения (8) и (9) относительно ρ , получим

$$\rho = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{c}{\alpha_p Gb}}. \quad (10)$$

Обозначив $\sqrt{\frac{c}{\alpha_p Gb}}$ через m_p , будем иметь:

$$\rho = m_p / d, \quad (11)$$

что с точки зрения физической картины пластической деформации объясняет увеличение плотности дислокаций при измельчении зерна поверхностного слоя термическим или механическим воздействием.

Для определения характера распределения тепла в объеме твердого тела можно воспользоваться интегралом вероятности:

$$v_T = \text{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{F_0 h}} \right); \quad (12)$$

v_T – относительная избыточная температура:

$$v_T = \frac{\Theta_k - \Theta_h}{\Theta_k - \Theta_0}, \quad (13)$$

где Θ_k – температура в контакте «инструмент-заготовка»; Θ_h – температура на глубине h ; Θ_0 – температура окружающей среды.

Выражение под корнем представляет из себя критерий Фурье и определяется:

$$F_{oh} = \frac{\alpha\tau}{h^2}, \quad (14)$$

где α – коэффициент температуропроводности материала заготовки, м²/с; τ – время действия теплового источника, с; h – расстояние от поверхности, м.

Решая совместно выражения (12) и (13) относительно Θ_h и пренебрегая Θ_0 , получим

$$\Theta_h = \Theta_k \left[1 - \text{erf} \left(\frac{h}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) \right]. \quad (15)$$

Время действия теплового источника на единичный участок поверхности, например, для точения определяется как $\tau = l_T / S_{\text{мин}}$, где $l_T = \sqrt{2rt}$, r – радиус резца при вершине; t – глубина резания.

Приведенные теоретические положения показывают, что в увеличении циклической прочности конструкционных материалов значительную роль может сыграть технология обработки деталей машин. Для формирования такой базы данных были проведены экспериментальные исследования наиболее распространенных способов финишной обработки деталей машин.

Определение плотности дислокаций осуществлялось по методике, предложенной Е.В. Панченко в работе [6]. В таблице приведены фрагменты базы данных технологических возможностей некоторых финишных методов обработки закаленных конструкционных и легированных сталей. По приведенным данным наглядно видна роль технологии в формировании такого параметра, как плотность дислокаций.

Несмотря на доказанную высокую информативность плотности дислокаций при оценке усталостной прочности в целом ряде случаев его нельзя рассматривать в отрыве от влияния других параметров состояния поверхностного слоя и, прежде всего, таких, как размер зерна металла и радиус впадин микронеровностей, являющихся концентраторами напряжений.

Определение среднего размера действительного зерна проводилось по ГОСТ 5639-82 с учетом рекомендаций Джеффриса. Исследования выполнялись на микроскопе мод. МИМ-8. Тщательно отполированные шлифы образцов подвергались травлению раствором следующего состава: 4 см³ соляной кислоты, 3 г пикриновой кислоты, 100 см³ этилового спирта. Средний размер действительного зерна определялся через число зерен, попавших в поле изображения, по формуле:

$$n_3 = P_3 + 0,5q - \frac{d}{4D}, \quad (16)$$

где n_3 – число зерен; P_3 – число зерен, целиком попавших в круг; q – число зерен, попавших частично; d – средний размер зерна; D – диаметр круга.

Затем рассчитывается средняя площадь зерна:

$$F = \frac{\pi D^2}{4M^2 n_3}, \quad (17)$$

или для квадрата со стороной A :

$$F = \frac{A^2}{M^2 n_3}. \quad (18)$$

В зависимостях (17) и (18) M – увеличение микроскопа.

Для исследования дислокаций также применялся способ химического травления шли-

фов. Последовательность использования реактивов была следующей: 2 %-ный спиртовой раствор; 4 %-ный спиртовой раствор пикриновой кислоты.

Подсчет производился по методике, предложенной Е.В. Панченко [6]. Плотность дислокации ρ определяется уравнением

$$\rho = \frac{b_{\text{ср}}}{S_{\text{действ.}}} [см^{-2}], \quad (19)$$

где $b_{\text{ср}}$ – среднее число ямок травления на площади (определялась по 25 полям);

$$S_{\text{действ.}} = \frac{S}{M^2}, \quad (20)$$

где S – площадь поля при увеличении M .

На рис. 1 приведены результаты исследования среднего размера действительного зерна и плотности дислокаций после точения сталей резцами из минералокерамики ВОК-60. Зависимости, отражающие влияние факторов точения на величину d , даны в полулогарифмической сетке координат. Интервалы варьирования факторов: $t = 0,2 \dots 1,0$ мм; $S = 0,08 \dots 0,16$ мм/об; $v = 100 \dots 500$ м/мин; $r = 0,2 \dots 1,0$ мм.

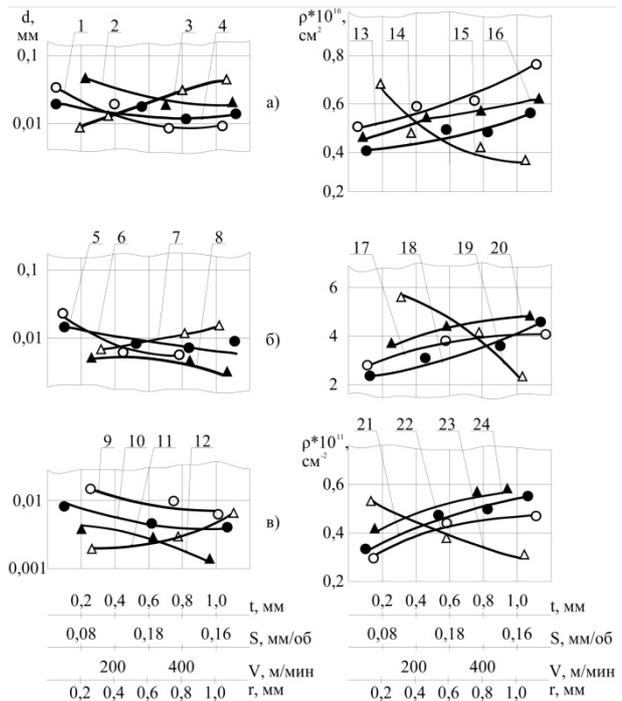


Рис. 1. Влияние факторов чистового точения резца из ВОК-60 на средний размер зерна и плотность дислокаций:

a – сталь 45 норм.; b – сталь 45 закал.; c – сталь 65Г закал.; \bullet – S ; \circ – P ; \triangle – v ; \blacktriangle – r

Анализ данных показывает, что наиболее сильно на величину зерна поверхностного слоя влияет скорость резания. Причем, с возрастанием скорости резания размер зерна увеличивается. Так, при точении нормализованной стали 45 со скоростью 100 м/мин средний размер действительного зерна составлял приблизительно 0,008...0,009 мм, а при скорости

540 м/мин – 0,014...0,015 мм. Это явление, скорее всего, связано с уменьшением времени воздействия деформационных факторов на микрообъемы металла поверхностного слоя. Остальные факторы: глубина, подача и радиус при вершине – с увеличением своих значений способствуют, как правило, снижению размера зерна, что связано с возрастанием силы резания. Характерно, что качественное влияние исследуемых факторов точения проявляется, практически, одинаково как при точении «сырой», так и закаленных сталей.

Если же приведенные данные перевести на «язык» ГОСТа 5639-82, то можно сказать, что при обработке нормализованной стали номер зерна изменяется в довольно широких пределах: от 5-го до 11-го и от 10-го до 14-го при точении закаленной стали 65 Г. Данные исследований закаленной стали 45 лежат приблизительно в середине этого диапазона.

Говоря о влиянии факторов точения на плотность дислокаций, прежде всего следует обратить внимание на увеличение этого параметра при росте всех факторов, кроме скорости резания, что связано как с уменьшением контактных давлений при увеличении скорости, так и с возрастающей пластичностью материала под действием более высоких температур поверхностного слоя.

Увеличение глубины резания, подачи и радиуса при вершине способствует увеличению влияния на поверхность либо деформационных, либо тепловых явлений, что инициирует как более активное движение уже имевшихся дислокаций, так и зарождение новых.

Характерной особенностью алмазного выглаживания с точки зрения формирования среднего размера зерна и плотности дислокаций является на порядок превышающие значения ρ (рис. 2), что объясняется самой сутью этого метода обработки, связанного с затратой практически всей энергии процесса на пластическое деформирование металла поверхностного слоя. Интервалы варьирования факторов: $P = 50...250$ Н; $S = 0,05...0,15$ мм/об; $v = 120...200$ м/мин. Например, при выглаживании закаленной стали 65Г плотность дислокаций при $P = 150$ Н, $S = 0,05$ мм/об и $v = 40$ м/мин достигает значения, приблизительно равного $1,25 \cdot 10^{11}$ см⁻².

Определенный теоретический и практический интерес представляет влияние сочетания таких факторов, как размер зерна и плотность дислокации на предел усталости. Как видно из рис. 3, в крупнозернистых поверхностных слоях металла зарождение и развитие усталостных трещин происходит более интенсивно, чем в мелкозернистых. Это связано с барьерным действием границ зерен, которые препятствуют движению дислокаций по одной из кристаллографических плоскостей. Физически подобная картина выглядит следующим образом: чем больше зерен в единице объема, тем больше границ зерен и, тем самым, больше барьеров для распространения зарождающихся

усталостных трещин. Поэтому одним из способов повышения усталостной прочности является создание наклепа в поверхностных слоях различными технологическими методами за счет измельчения зерен под действием силовых факторов.

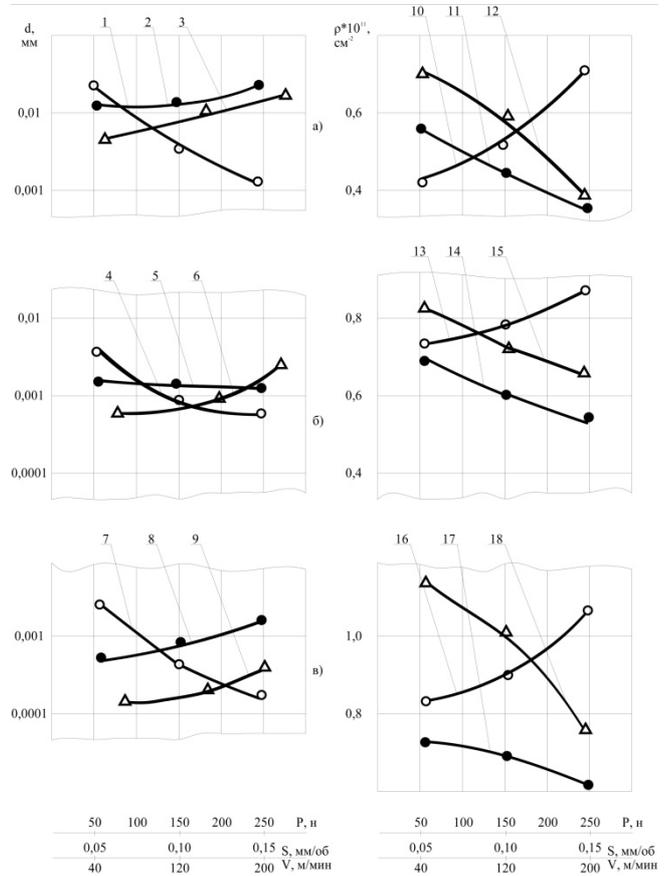


Рис. 2. Влияние факторов алмазного выглаживания на средний размер зерна и плотность дислокаций: а – сталь 45 норм.; б – сталь 45 закал.; в – сталь 65Г закал.; ●—●—S; ○—○—P; △—△—v

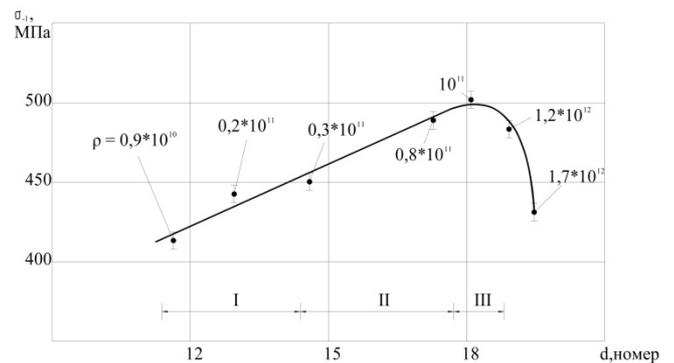


Рис. 3. Влияние плотности дислокаций на предел выносливости закаленной стали 45; I – точение керамикой Вок – 60; II – однопроходное алмазное выглаживание; III – двухпроходное алмазное выглаживание

В то же время при наличии очень мелкого зерна и плотности дислокаций, превышающих $1,1 \cdot 10^{12}$ см⁻², материал начинает работать в ус-

ловиях хрупкого разрушения, что резко снижает его предел усталости. Подобное явление часто называют «перенаклепом».

В качестве примера, подтверждающего изложенную физическую картину, можно привести рекомендованную технологию обработки одной из деталей рулевого механизма автомобиля специального назначения. Данная деталь в процессе эксплуатации испытывает постоянные знакопеременные нагрузки и в наиболее нагруженном сечении наблюдаются систематические разрушения поверхностного слоя.

Для исключения подобных ситуаций была сделана попытка подготовить к эксплуатации рабочую поверхность, применив в заключительной стадии технологического маршрута две операции: чистовое точение резцами из гексанита-Р и лепестковое полирование. Подобное сочетание позволило «снять» верхний поверхностный мелкозернистый слой материала, допустив к эксплуатации структуру с размером зерна, обладающим определенным запасом пластичности.

В качестве инструмента для полирования был использован специально разработанный лепестковый круг, защищенный авторским свидетельством А.С. 1511099, позволяющий обеспечивать требуемую производительность в условиях серийного производства и заданную шероховатость поверхности.

Из режимной части лепесткового полирования важнейшим технологическим фактором является время полирования, влияние которого на предел выносливости представлено на рис. 4.

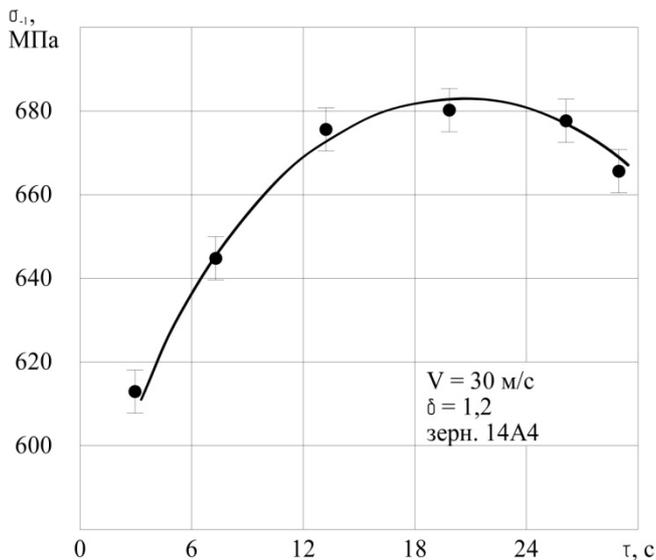


Рис. 4. Влияние времени полирования на предел выносливости

Из графика видно, что с увеличением времени полирования приблизительно до 20 с, усталостная прочность резко увеличивается (с 615 до 680 МПа), а затем начинает снижаться и при времени полирования 28 с доходит до

665 МПа. То есть, очевидно, что зависимость носит экстремальный характер. Причиной установленной закономерности является то, что оптимальное время полирования соответствует такой величине съема металла, после которого поверхностный слой формируется из зерен достаточно малых, обеспечивающих эффективное торможение зарождающихся микротрещин и то же время с плотностью дислокаций, оставляющей достаточный запас пластичности. Увеличение же съема приводит к снятию мелкозернистой структуры и, следовательно, к уменьшению барьерных свойств границ зерен.

Подводя итог данной работы, можно сделать вывод о необходимости комплексного подхода к проблеме обеспечения усталостной прочности деталей машин, как при теоретических, так и при экспериментальных исследованиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова, В.С. Разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.
2. Тотай, А.В. Технологическое обеспечение физических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей машин // Трение и износ. – 1997. – Т. 18. – №3. – С. 385-394.
3. Тотай, А.В. Технологическое управление усталостной прочностью при лезвийных методах обработки // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – №5. – С. 133-136.
4. Тотай, А.В. Технологическое обеспечение физико-химических свойств поверхностного слоя деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении – 2012. – №9. – С. 8-11.
5. Паргон, В.З., Морозов, Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
6. Лаборатория металлографии / под ред. Б.Г. Лившица – М.: Металлургия. 1965. – 439 с.
7. Тотай, А.В., Гдалевич, А.И. и др. Лепестковый полировальный круг. А.С. СССР №1511099, 01.06. 1989 г.

REFERENCES

1. Ivanova, V.S. *Metal Destruction*. – M.: Metallurgy, 1979. – pp. 168.
2. Totay, A.V. Technological support of physical and operation properties in surface layers of machinery // *Friction and Wear*. – 1997. – Vol.18. – No. 3. – pp. 385-394.
3. Totay, A.V. Technological control of fatigue strength at edge working methods // *College Proceedings. Mechanical Engineering*. – 1990. – No. 5. – pp. 133-136.
4. Totay, A.V. Technological support of physical-chemical properties of machinery surface layers // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* – 2012. – No. 9. – pp. 8-11.
5. Parton, V.Z., Morozov, E.M. *Mechanics of Elastic-Plastic Destruction*. – M.: Science, 1985. – pp. 504.
6. *Laboratory of Metallography* / under the editorship of B.G. Livshits – M.: Metallurgy. 1965. – pp. 439.
7. Totay, A.G., Gdalevich, A.I. et al. *Petal Polishing Disk*. AS of the USSR No. 1511099, 01.06. 1989.

Рецензент д.т.н. А.Н. Романов