

УДК 621.7.015

DOI: 10.30987/article_5c8b5cea063335.55319966

А.В. Тотай

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРЕДЕЛА УСТАЛОСТИ

Рассмотрены теоретические вопросы влияния плотности дислокаций металла поверхностного слоя на усталостную прочность деталей машин и возможности практической реализации управления

данным эксплуатационным свойством технологическими методами.

Ключевые слова: усталостная прочность, плотность дислокаций, технологические напряжения, эксплуатационные напряжения.

A.V. Totay

ANALYTICAL APPROACH TO TECHNOLOGICAL SUPPORT OF FATIGUE LIMIT

In the paper on the basis of the theory of metal plastic deformation there are obtained analytical dependences of dislocations critical density and cycle number up to destruction caused by factors technological impact upon the surface under working.

For the first time in complex there are taken into account such physical characteristics as an effort, tem-

perature and speed of deformation in the area of cutting and strengthening.

A tie between such parameters of surface layer state as a steel grain size and dislocations density is defined.

Key words: fatigue strength, dislocations density, technological stresses, operational stresses.

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 технологических 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 ис-

пользовать большие резервы 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 отожженных 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:

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

где σ - действующее напряжение; G - модуль сдвига; b - вектор Бюргерса; ρ - плотность дислокаций.

Из выражения (1)

$$\rho = (2\pi\sigma / Gb)^2. \quad (2)$$

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: металлургическо-термической, технологической и эксплуатационной. То есть

$$\rho = \rho_{MT} + \rho_{TX} + \rho_{Э}.$$

$$\rho = \rho_{ИСХ} + \left[\frac{4\pi}{b}(1+\mu) \right]^2 \left\{ E^{-2} \left[\left(\frac{\sigma_{TX}}{\psi_{TX}} \right)^2 + N \left(\frac{\sigma_{Э}}{\psi_{Э}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3)$$

В зависимости (3) σ_{TX} и $\sigma_{Э}$ - технологические и эксплуатационные напряжения с соответствующими коэффициентами; N -

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 температуру и скорость деформации металла поверхностного слоя [2-4], получим:

число циклов действия напряжений в процессе эксплуатации.

Из уравнения (3) можно определить число циклов N до разрушения:

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

Обозначив $\frac{4\pi(1+\mu)}{bE}$ через $\omega = \text{const}$ для данного материала, получим:

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

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

$$\rho = (2\pi k_{\rho} \sigma_b / Gb)^2,$$

где σ_b - предел прочности; $k_{\rho} = 0,5...0,7$.

Исследование дислокационной структуры поверхностного слоя является достаточно сложной и трудоемкой задачей, требующей наличия дорогостоящего оборудования. В ряде случаев можно воспользоваться неизбежной связью между такими параметрами, как плотность дислокаций и размер зерна приповерхностного слоя.

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

$$\sigma_T'' = \sigma_T + \alpha_{\rho} Gb \sqrt{\rho}, \quad (4)$$

где σ_D'' - предел текучести материала с учетом скоростных и температурных факторов обработки; α_{ρ} - коэффициент, зависящий от природы металла, его кристаллической решетки и структуры.

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

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

Решая совместно уравнения (4) и (5) относительно ρ , получим:

$$\rho = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{c}{\alpha_{\rho} Gb}}.$$

Обозначив $\sqrt{\frac{c}{\alpha_{\rho} Gb}}$ через m_{ρ} , будем

иметь

$$\rho = m_{\rho} / d,$$

что с точки зрения физической картины пластической деформации объясняет увеличение плотности дислокаций при из-

мельчении зерна поверхностного слоя термическим или механическим воздействием.

Таблица 1

Фрагмент базы технологических возможностей некоторых финишных методов обработки

| № п/п | Метод обработки | Условия обработки | | | | Достижимые размеры | | |
|-------|--|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------|--------------------|-----------|--|
| | | Инструмент | Глубина резания, мм | Подача | Скорость | Квалитет точности | Ra, мкм | Плотность дислокаций, см ⁻² |
| 1 | Обтачивание чистовое | ВОК 71 | 0,6-0,8 | 0,08-0,12 мм/об | 140-160 м/мин | 7-8 | 0,63-1,25 | (5-10)10 ¹⁰ |
| 2 | Обтачивание тонкое | Композит 10 | 0,2-0,4 | 0,004-0,006 мм/об | 180-200 м/мин | 6-7 | 0,32-0,63 | (4-7)10 ¹⁰ |
| 3 | Чистовое круглое наружное шлифование | 23 А зерно 12 | 0,006-0,008 | 300-400 мм/мин | 30 м/с | 6-7 | 0,32-0,63 | (2-4)10 ¹⁰ |
| 4 | Чистовое круглое наружное шлифование с выглаживанием | 23 А зерно 12 | 0,006-0,008 | 300-400 мм/мин | 30 м/с | 6-7 | 0,16-0,32 | (0,8-1,5)10 ¹⁰ |
| 5 | Тонкое круглое наружное шлифование | АСК зерно 28 | 0,004-0,006 | 100-200 мм/мин | 60 м/с | 6 | 0,8-0,16 | (5-7)10 ¹⁰ |
| 6 | Алмазное выглаживание | АСПК радиус 1,5 | Нагрузка 160-220 Н | 0,05-0,07 мм/об | 120-160 м/мин | 7-8 | 0,08-0,16 | (0,8-1,2)10 ¹¹ |
| 7 | Лепестковое полирование | ЛКП 14 А8 | Натяг лепестков 1,0-1,2 | 2000 мм/мин | 35 м/с | 6-7 | 0,1-0,3 | (0,6-1,0)10 ¹⁰ |

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

$$v_T = \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{F_0 h}} \right). \quad (6)$$

Здесь v_T - относительная избыточная температура, равная отношению

$$v_T = \frac{\Theta_k - \Theta_h}{\Theta_k - \Theta_0}, \quad (7)$$

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 как

$$F_{oh} = \frac{\alpha \tau}{h^2},$$

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

Решая совместно выражения (6) и (7) относительно Θ_h и пренебрегая Θ_0 , получим:

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

Время действия теплового источника на единичный участок поверхности, например, для точения определяется как $\tau = l_T / S_{\min}$, 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.

Плотность дислокаций определялась по методике, предложенной Е.В. Панченко [6].

В табл. 1 приведены фрагменты базы данных технологических возможностей некоторых финишных методов обработки закаленных конструкционных и легированных сталей. По данным наглядно видна роль технологии в формировании такого параметра, как плотность дислокаций.

На рис. 1 приведены результаты исследований 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. Условия экспериментов, не оговоренные на рис. 1, даны в табл. 2. 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 при точении сырой и закаленных сталей.

Если же приведенные данные перевести на язык ГОСТ 5639-82, то можно сказать, что при обработке нормализованной стали номер зерна изменяется в довольно широких пределах: от 5 до 11 и от 10 до 14 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 являются на порядок превышающие значения ρ (рис. 2 и табл. 3), что объясняется самой сутью этого метода обработки, связанного с затратой практически всей энергии процесса на пластическое деформирование металла поверхностного слоя. 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 $1,25 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

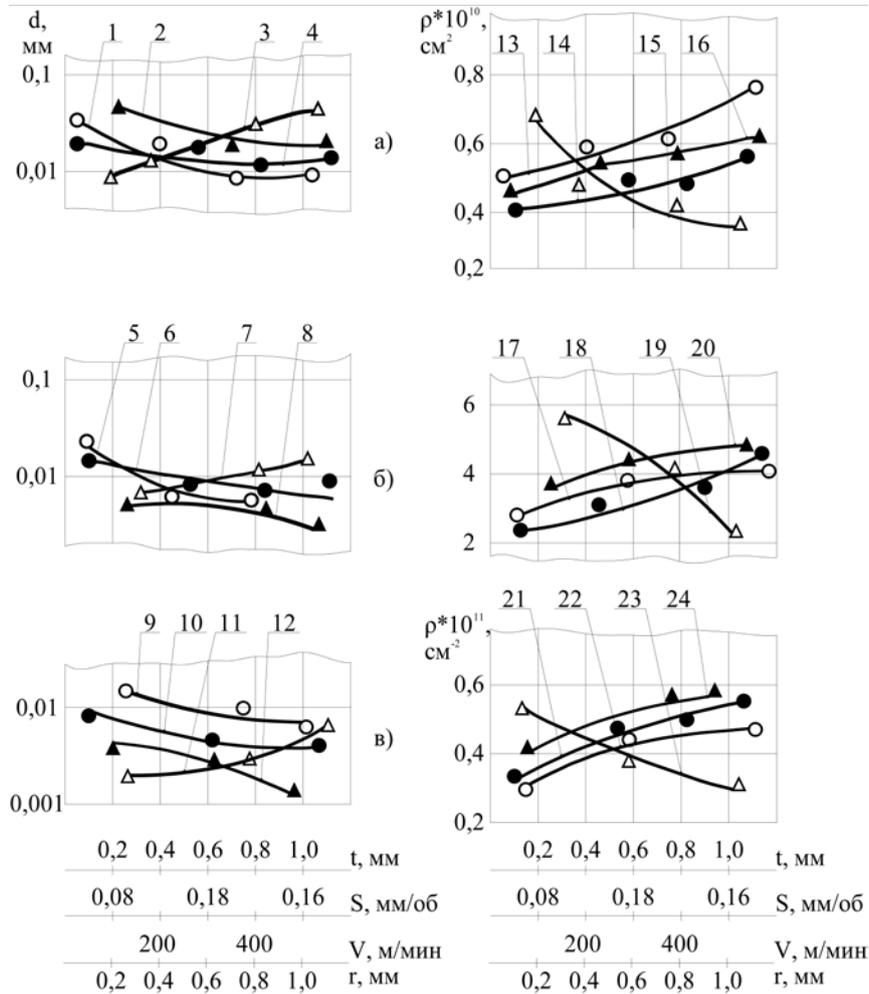


Рис. 1. Влияние факторов чистового точения резцами из ВОК-60 на средний размер зерна и плотность дислокаций: а - ст. 45 норм.; б - ст. 45 закал.; в - ст. 65Г закал.; ●-● - S; ○-○ - P; △-△ - V; ▲-▲ - r

Таблица 2

Условия исследований среднего размера зерна и плотности дислокаций при точении

| Исследуемый параметр | Материал | Кривая | t , мм | S , мм/об | V , м/мин | r , мм |
|--------------------------------------|------------------|--------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| Средний размер действительного зерна | Сталь 45 нормал. | 1 | 0,05-1,05 | 0,08 | 200 | 1,2 |
| | | 2 | 0,3 | 0,063-0,17 | 200 | 1,2 |
| | | 3 | 0,3 | 0,08 | 40-550 | 1,2 |
| | | 4 | 0,3 | 0,08 | 200 | 0,22-1,1 |
| | Сталь 45 закал. | 5 | 0,07-0,7 | 0,08 | 200 | 1,2 |
| | | 6 | 0,3 | 0,7-0,17 | 200 | 1,2 |
| | | 7 | 0,3 | 0,08 | 80-490 | 1,2 |
| | | 8 | 0,3 | 0,08 | 200 | 1,2 |
| | Сталь 65Г закал. | 9 | 0,25-1,2 | 0,08 | 200 | 1,2 |
| | | 10 | 0,3 | 0,07-0,17 | 200 | 1,2 |
| | | 11 | 0,3 | 0,08 | 60-570 | 1,2 |
| | | 12 | 0,3 | 0,08 | 200 | 0,25-1,05 |
| Плотность дислокаций | Сталь 45 норм. | 13 | 0,07-1,15 | 0,08 | 200 | 1,2 |
| | | 14 | 0,3 | 0,065-0,17 | 200 | 1,2 |
| | | 15 | 0,3 | 0,08 | 55-570 | 1,2 |
| | | 16 | 0,3 | 0,08 | 200 | 0,08-1,15 |

| Исследуемый параметр | Материал | Кривая | t , мм | S , мм/об | V , м/мин | r , мм |
|----------------------|------------------------|--------|----------|-------------|-------------|-----------|
| | Сталь 45 закал. | 17 | 0,1-1,2 | 0,08 | 200 | 1,2 |
| | | 18 | 0,3 | 0,07-0,17 | 200 | 1,2 |
| | | 19 | 0,3 | 0,08 | 35-580 | 1,2 |
| | | 20 | 0,3 | 0,08 | 200 | 0,25-1,1 |
| | Сталь 65Г закал. | 21 | 0,1-1,1 | 0,08 | 200 | 1,2 |
| | | 22 | 0,3 | 0,074-0,17 | 200 | 1,2 |
| | | 23 | 0,3 | 0,08 | 70-560 | 1,2 |
| | | 24 | 0,3 | 0,08 | 200 | 0,15-0,95 |

Таблица 3

Условия исследований среднего размера зерна и плотности дислокаций при алмазном выглаживании

| Исследуемый параметр | Материал | Кривая | P , Н | S , мм/об | V , м/мин |
|--------------------------------------|------------------------|--------|---------|-------------|-------------|
| Средний размер действительного зерна | Сталь 45 нормал. | 1 | 50-250 | 0,05 | 120 |
| | | 2 | 150 | 0,05-0,15 | 120 |
| | | 3 | 150 | 0,05 | 40-200 |
| | Сталь 45 закал. | 4 | 50-250 | 0,05 | 120 |
| | | 5 | 150 | 0,05-0,15 | 120 |
| | | 6 | 150 | 0,05 | 40-200 |
| | Сталь 65Г закал. | 7 | 50-250 | 0,05 | 120 |
| | | 8 | 150 | 0,05-0,15 | 120 |
| | | 9 | 150 | 0,05 | 40-200 |
| Плотность дислокаций | Сталь 45 нормал. | 10 | 50-250 | 0,05 | 120 |
| | | 11 | 150 | 0,05-0,15 | 120 |
| | | 12 | 150 | 0,05 | 40-200 |
| | Сталь 45 закал. | 13 | 50-250 | 0,05 | 120 |
| | | 14 | 150 | 0,05-0,15 | 120 |
| | | 15 | 150 | 0,05 | 40-200 |
| | Сталь 65Г закал. | 16 | 50-250 | 0,5 | 120 |
| | | 17 | 150 | 0,05-0,15 | 120 |
| | | 18 | 150 | 0,05 | 40-200 |

Несмотря на доказанную высокую информативность плотности дислокаций при оценке усталостной прочности, в целом ряде случаев ее нельзя рассматривать

в отрыве от влияния других параметров состояния поверхностного слоя, прежде всего таких, как размер зерна металла и радиус впадин микронеровностей.

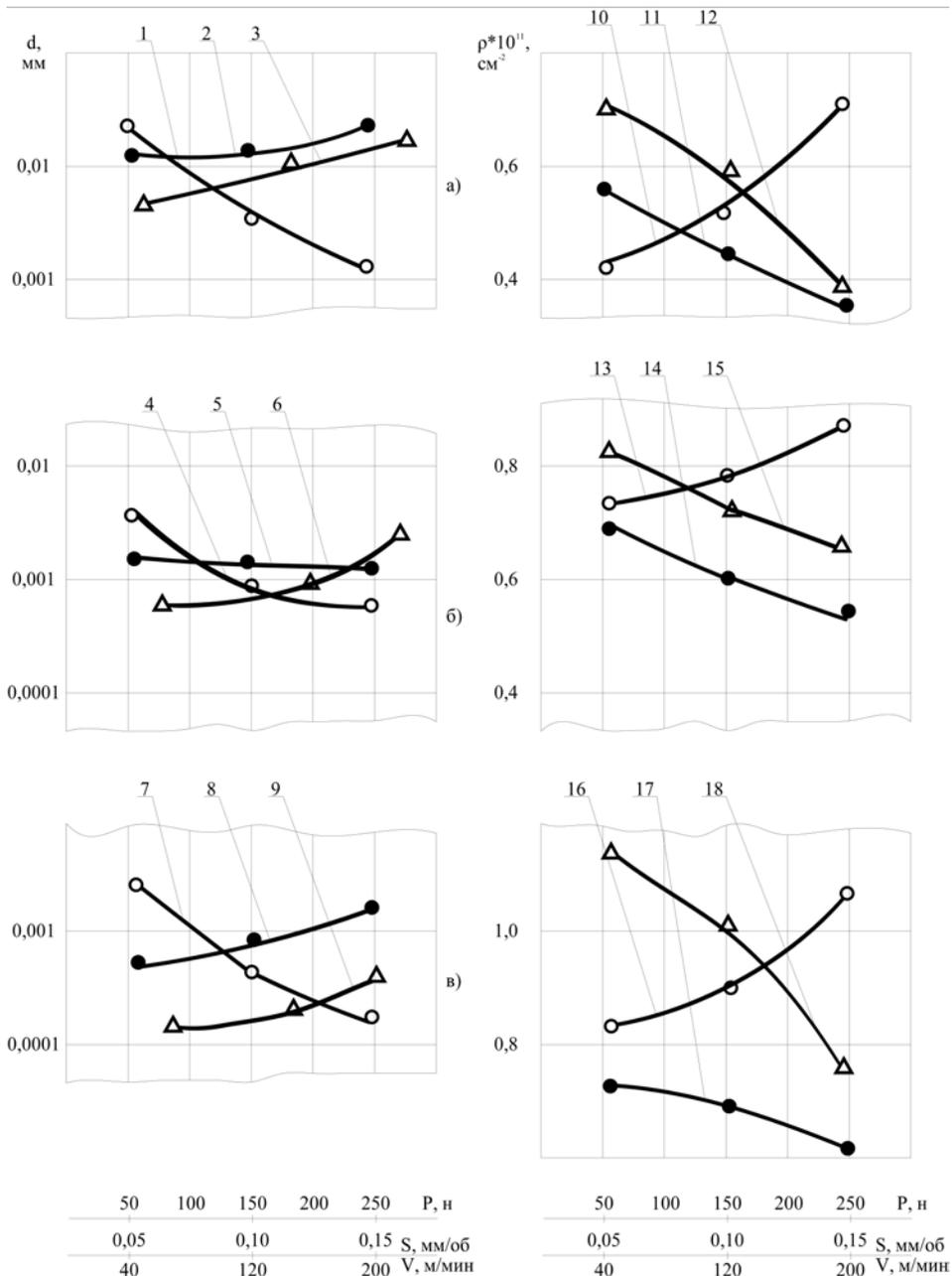


Рис. 2. Влияние факторов алмазного выглаживания на средний размер зерна и плотность дислокаций: а - ст. 45 норм.; б - ст. 45 закал.; в - ст. 65Г закал.; ●—● - S; ●—● - P; △—△ - V

Другими словами, научный подход к проблеме технологического обеспечения усталостной прочности должен носить

комплексный характер как при теоретических, так и при экспериментальных исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова, В.С. Разрушение металлов / В.С. Иванова. - М.: Металлургия, 1979. - 168 с.
2. Тотай, А.В. Технологическое обеспечение физических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей машин / А.В. Тотай // Трение и износ. - 1997. - Т. 18. - № 3. - С. 385-394.
3. Тотай, А.В. Технологическое управление усталостной прочностью при лезвийных методах

4. Тотай, А.В. Технологическое обеспечение физико-химических свойств поверхностного слоя деталей машин / А.В. Тотай // Научные исследования в машиностроении. - 2012. - № 9. - С. 8-11.

5. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. - М.: Наука, 1985. - 504 с.
6. Лаборатория металлографии / под ред. Б.Г. Лившица. - М.: Металлургия, 1965. - 439 с.
1. Ivanova, V.S. Metal Destruction / V.S. Ivanova. – М.: Metallurgy, 1979. – pp. 168.
2. Totay, A.V. Technological support of physical and operational properties of machinery surface layers / A.V. Totay // Friction and Wear. – 1997. – Vol.18. – No.3. – pp. 385-394.
3. Totay, A.V. Technological control of fatigue strength at blade treatment methods / A.V. Totay // College Proceedings. Mechanical Engineering. – 1990. – No.5. – pp. 133-136.
4. Totay, A.V. Technological support of physical-chemical properties of machinery surface layer / A.V. Totay // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2012. – No.9. – pp. 8-11.
5. Parton, V.Z. Mechanics of Elastic-Plastic Destruction / V.Z. Parton, E.M. Morozov. – М.: Science, 1985. – pp. 504.
6. Laboratory of Metallography / under the editorship of B.G. Lifshits. – М.: Metallurgy, 1965. – pp. 439.

Статья поступила в редакцию 6.12.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного аграрного университета

Белова Т.И.

Статья принята к публикации 12.02.19.

Сведения об авторах:

Тотай Анатолий Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и

химия» Брянского государственного технического университета, e-mail: totai_av@mail.ru.

Totay Anatoly Vasilievich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Life Safety and Chemistry", Bryansk State Technical University, e-mail: totai_av@mail.ru.