DOI: 10.15593/2224-9982/2015.43.10

УДК 621.9

В.Ф. Безъязычный¹, М.А. Прокофьев¹, Н.В. Виноградова²

¹ Рыбинский государственный авиационный технический
университет им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

² ООО «КРОНЕ Инжиниринг», Ярославль, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА НАКОПЛЕННУЮ ЭНЕРГИЮ ДЕФОРМАЦИИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДЕТАЛЕЙ

Изложены результаты теоретического исследования уровня удельной накопленной энергии деформации в зависимости от технологических условий механической обработки (скорости резания, подачи, глубины резания), а также геометрических параметров режущего инструмента (переднего и заднего углов, главного и вспомогательного углов резца в плане, радиуса округления режущей кромки и радиуса при вершине угла в плане) и физико-механических свойств обрабатываемого материала (предела прочности, предела текучести и относительного удлинения). Представлены математическая зависимость, позволяющая рассчитывать удельную накопленную энергию деформации по глубине наклепа с учетом исходной микротвердости обрабатываемого материала, и графические зависимости удельной накопленной энергии деформации от параметров процесса резания при токарной обработке (скорости резания и подачи), которые позволяют рассчитать удельную накопленную энергию деформации с учетом скорости резания и подачи, а также глубины резания и геометрии инструмента (переднего и заднего углов, главного и вспомогательного углов резца в плане, радиуса округления режущей кромки и радиуса при вершине угла в плане) и физико-механических свойств обрабатываемого материала (предела прочности, предела текучести обрабатываемого материала и его относительного удлинения). Установлены зависимости как для конструкционных сталей, так и для обработки титанового сплава и жаропрочного никелевого сплава.

Ключевые слова: накопленная энергия деформации, дислокация, упрочнение, глубина наклепа, режимы обработки.

V.F. Bezzyazychny¹, M.A. Prokofev¹, N.V. Vinogradova²

¹ P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University,
Rybinsk, Russian Federation

² LLC "KROHNE Engineering", Yaroslavl, Russian Federation

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MACHINING CONDITIONS ON THE ACCUMULATION OF LATENT ENERGY DEFORMATION IN THE SURFACE PARTS

The results of the theoretical study of specific latent energy of deformation depending on machining conditions of mechanical operation (cutting speed, cutting feed, cutting depth) and geometric parameters of the cutting tool (the front and rear corners of the main and auxiliary cutting edge angles in plan, the

radius of the rounding of the cutting edge and the radius of the apex angle in the plan), and physico-mechanical properties of the processed material (tensile strength, yield strength and relative extension) are stated. Mathematical dependency, allowing calculate the specific latent energy of deformation on the depth of work hardening (taking into account the initial microhardness of the material being processed) and graphic dependencies of specific latent energy of deformation from parameter of the cutting operation under turning are represented. Obtained dependences allow to calculate the specific latent deformation energy with the cutting speed and feed and depth of cut and the tool geometry (front and rear corners of the main and auxiliary cutting edge in terms of angles, the radius of rounding of the cutting edge radius and angle at the apex in terms) and physical-mechanical properties of the processed material (tensile strength, yield strength of the material being treated and its elongation). The dependencies for structural steels and for processing a titanium alloy and nickel superalloys were determined.

Keywords: latent energy of deformation, dislocation, strain hardening, depth of work hardening, machining conditions.

Согласно исследованиям [1, 2] рассмотрение вопроса о соотношении затраченной и поглощенной энергий при механическом воздействии на материал имеет определенный научный и практический интерес. Так, величина поглощенной энергии несет информацию о свойствах и состоянии деформированного (упрочненного) материала, поскольку она почти полностью определяет энергию дефектов кристаллической структуры (вакансий, внедренных атомов, дислокаций и др.), образовавшихся при деформации. Свойства и состояние поверхностного слоя материала, в свою очередь, определяют показатели качества поверхностного слоя, которые характеризуют эксплуатационные характеристики деталей машин. Изучение закономерностей накопления и выделения накопленной энергии деформации в значительной мере способствует развитию представлений как о процессах, происходящих в материале во время деформирования, так и о характере возникающих при этом остаточных искажений решетки.

А.М. Сулима (при анализе кривых упрочнения при сжатии-растяжении) отмечает, что насыщение или порог упрочнения для углеродистых сталей наступает при степенях деформации 40–50 % [3].

Основываясь на теории закономерности накопленной энергии деформации, можно ожидать, что она определяется не только отходом, но и упрочнением. Накопленная энергия деформации металлов, представляющая главным образом плотность дислокаций, характеризует их механические свойства, в частности упрочнение [1].

Количество выделившейся энергии при механической обработке является основой для энергетических критериев, позволяющих оптимизировать технологические режимы механической обработки. Статус комплексного показателя качества поверхностного слоя деталей объясняет пристальное внимание к накопленной энергии де-

формации различных научных школ, которые на ее основе предлагают энергетические критерии оптимизации операций механической обработки [2].

Расчетные методы определения уровня накопленной энергии деформации в поверхностном слое материала при обработке точением применительно к жаропрочным сплавам на хромоникелевой основе разработаны В.К. Старковым [4]. Накопленная энергия деформации является параметром, определяющим свойства поверхностных слоев обработанной детали, так как трансформация свойств этих слоев относительно исходных является результатом изменения энергии межатомных или межмолекулярных связей в пределах данного объема, т.е. результатом поглощения или выделения энергии.

Удельную накопленную энергию деформации образовавшихся при пластической деформации дислокаций можно определить по зависимости [2]

$$W = \frac{Q}{\alpha^2 G} (\sigma - \sigma_{0,2})^2, \quad (1)$$

где W – удельная накопленная энергия деформации, Дж/мм³; α – параметр междислокационного взаимодействия, который зависит от прочностных свойств материала и определяется по методике, представленной авторами в работе [2]; G – модуль сдвига материала обрабатываемой детали, МПа; σ – напряжение течения, МПа; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа; Q – коэффициент пропорциональности, определяемый по формуле

$$Q = \frac{1}{4\pi k} \ln \frac{R}{r_0} \approx 0,5...1,$$

где k – коэффициент ($k = 1$ для винтовой дислокации, $k = 1 - \mu$ для краевой дислокации, μ – коэффициент Пуассона); R – внешний ограниченный радиус ($R = 1$ мкм); r_0 – радиус внутреннего цилиндра (ядра дислокации), $r_0 = b/2$, b – модуль вектора Бюргерса.

Исследования В.М. Розенберга, Г.Д. Деля и других авторов показывают, что между напряжением течения σ и микротвердостью HV существует взаимосвязь вида

$$\sigma = 0,32HV. \quad (2)$$

Тогда удельную накопленную энергию деформации можно определить по формуле

$$W = \frac{Q}{\alpha^2 G} [0,32(HV - HV_0)]^2, \quad (3)$$

где $(HV - HV_0)$ – изменение микротвердости на определенной глубине в сравнении с микротвердостью недеформированного металла, МПа.

Степень наклепа N , %, согласно источнику [5], определяется следующим образом:

$$N = \frac{h_n}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B.э})^{0,8}}, \quad (4)$$

где h_n – глубина наклепа, мкм; σ_B – предел прочности обрабатываемого материала при растяжении, МПа; $\sigma_{B.э}$ – предел прочности электротехнической стали, принятой за эталон, МПа.

Также степень наклепа может быть рассчитана по формуле

$$N = \frac{HV - HV_0}{HV_0}. \quad (5)$$

Приравнивая выражения (4) и (5), получаем

$$HV - HV_0 = \frac{h_n}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B.э})^{0,8}} HV_0. \quad (6)$$

При подстановке правой части выражения (6) в уравнение (3) определяем

$$W = \frac{Q}{\alpha^2 G} \left(\frac{0,32 h_n}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B.э})^{0,8}} HV_0 \right)^2. \quad (7)$$

Согласно зависимости (2) предел текучести материала $\sigma_{0,2} = 0,32 HV_0$. Тогда математическая модель, позволяющая рассчитать удельную накопленную энергию деформации, приобретает вид

$$W = \frac{Q}{\alpha^2 G} \left(\frac{\sigma_{0,2} h_n}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B.э})^{0,8}} HV_0 \right)^2. \quad (8)$$

Исследования [6–9] показывают, что решающее влияние на формирование в поверхностном слое детали шероховатости, наклепа, ос-

таточных напряжений оказывают технологические условия обработки (режимы резания, геометрия режущего инструмента, свойства обрабатываемого и инструментального материала). В связи с этим установление функциональной зависимости, отражающей влияние технологических условий обработки на уровень накопленной энергии деформации в поверхностном слое материала при механической обработке, является актуальной технологической задачей.

Пример. Рассмотрим данную задачу для наиболее распространенного вида механической обработки деталей – точения. Решение сформулированной выше задачи сводится к расчетному определению глубины наклепа в поверхностном слое детали в зависимости от технологических условий токарной обработки. Для этого воспользуемся методикой, разработанной в результате теоретических исследований профессором В.Ф. Безъязычным.

Для расчета накопленной энергии деформации в поверхностном слое детали были выбраны следующие материалы: стали 15 и 45, ХН77ТЮР, ВТЗ-1. Рассматривали обработку на токарном станке нормальной точности в центрах.

Для обработки сталей 15 и 45 в качестве материала инструмента был выбран сплав Т15К6, для сплавов ХН77ТЮР и ВТЗ-1 – режущий инструмент из сплава ВК8.

Геометрия инструмента в соответствии с общемашиностроительными рекомендациями применялась следующая: главный угол в плане $\varphi = 45, 50, 55, 60^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 10, 15, 20, 25, 30^\circ$; задний угол $\alpha = 6, 8, 10, 12^\circ$; передний угол $\gamma = \alpha$; радиус при вершине резца в плане $r = 0,5; 0,7; 1; 1,2; 1,5$ мм; радиус округления режущей кромки $\rho_1 = 18, 20, 22, 24, 30$ мкм; высота фаски износа резца по задней грани $\Delta_{\text{изн}} = 0, 20, 40, 60, 80$ мкм.

В расчетах коэффициент Q принят равным 1. Режимы обработки: для сталей 15 и 45 скорости резания $v = 180, 195, 210, 225, 240, 246, 270, 282$ м/мин; для ХН77ТЮР и ВТЗ-1 скорости резания $v = 10, 20, 30, 40, 60, 70, 80, 95$ м/мин; подачи $S = 0,11; 0,15; 0,23; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45$ мм/об.; глубины резания $t = 0,2; 0,3; 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ мм.

Перед расчетом накопленной энергии деформации было установлено изменение глубины наклепа в поверхностном слое детали при точении для сравнения закономерностей ее изменения с изменением накопленной энергии деформации в зависимости от режимов резания,

геометрии инструмента и свойств обрабатываемого материала и материала инструмента.

Глубину наклепа определяли в соответствии с программным обеспечением, разработанным в Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева и зарегистрированным в отраслевом фонде алгоритмов и программ¹. Примеры графиков, отражающих результаты расчетов глубины наклепа в зависимости от технологических условий обработки, представлены на рис. 1 и 2 в двойных логарифмических координатах.

Рис. 1. Зависимости глубины наклепа от скорости резания для сталей 15 (1) и 45 (2) ($S = 0,23$ мм/об.; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{изн} = 20$ мкм)

Рис. 2. Зависимости глубины наклепа от скорости резания для ХН77ТЮР (1) и ВТЗ-1 (2) ($S = 0,23$ мм/об.; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{изн} = 20$ мкм)

¹ Расчет технологических условий токарной обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхностного слоя и точность обработки: св-во об отрасл. рег-и разработки № 3457 / Безъязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Волков С.А.; организация-разработчик Рыбинск. гос. авиац. технол. академия им. П.А. Соловьева; зарег. в Отрасл. фонде алгоритмов и программ 21.04.04.

Далее определяли влияние технологических условий обработки на уровень накопленной энергии деформации в поверхностном слое материала детали при токарной обработке для указанных выше условий и модельных материалов (рис. 3, 4).

Рис. 3. Зависимости накопленной энергии деформации от скорости резания для сталей 15 (1) и 45 (2) в двойных логарифмических координатах ($S = 0,23$ мм/об.; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{изн} = 20$ мкм)

Рис. 4. Зависимости накопленной энергии деформации от скорости резания для ХН77ТЮР (1) и ВТ3-1 (2) в двойных логарифмических координатах ($S = 0,23$ мм/об.; $t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{изн} = 20$ мкм)

Было установлено:

1. С возрастанием скорости резания накопленная энергия деформации уменьшается. Это обусловлено снижением интенсивности деформационного упрочнения поверхностного слоя в связи с активизацией процессов разупрочнения. С увеличением скорости резания возрастает температура нагрева, приводящая к повышению диффузионной подвижности атомов кристаллической решетки, уменьшению искаже-

ний кристаллической решетки, следовательно, снижению упрочнения и уровня накопленной энергии деформации.

2. При увеличении подачи накопленная энергия деформации возрастает в связи с увеличением глубины наклепа, так как подача в основном оказывает силовое воздействие на поверхностный слой и при ее возрастании повышается упрочнение поверхностного слоя детали.

3. С ростом глубины резания уровень накопленной энергии деформации увеличивается. Это обуславливается тем, что увеличение глубины резания приводит к увеличению числа дефектов кристаллической структуры, сопровождаясь увеличением поверхностной твердости, наклепа и, следовательно, возрастанием накопленной энергии.

4. При увеличении главного угла в плане ϕ и радиуса округления режущей кромки резца ρ_1 удельная накопленная энергия деформации увеличивается, так как возрастание этих параметров приводит к повышению упрочнения поверхностного слоя материала детали. С увеличением переднего γ и заднего α углов резца, а также радиуса r при вершине резца в плане уровень удельной накопленной энергии деформации снижается по причине уменьшения количества искажений кристаллической решетки, а следовательно, снижения упрочнения поверхностного слоя детали.

Для расчетного определения удельной накопленной энергии деформации при точении могут быть получены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между накопленной энергией деформации и технологическими условиями обработки, на основании расчетов по ранее изложенной методике и обработки результатов расчета (рис. 5).

Установлен общий характер взаимосвязи удельной накопленной энергии деформации W при токарной обработке для всех рассматриваемых материалов с каждым из основных параметров процесса резания в отдельности (от v , S , t , ϕ , ϕ_1 , α , γ , r , ρ_1 , $\Delta_{изн}$).

Из аналогичной графической информации (см. рис. 5) были получены формулы расчета удельной накопленной энергии деформации в зависимости от всех параметров процесса резания для рассматриваемых материалов:

– при обработке стали 15

$$W = C_1 \cdot t^{0,24} \cdot v^{-0,56} \cdot S^{9,52} \cdot \phi^{0,70} \cdot \alpha^{-0,19} \cdot \gamma^{-0,62} \cdot \rho_1^{0,29} \cdot r^{-0,30};$$

$$C_1 = 1,9 \cdot 10^{-6};$$

– при обработке стали 45

$$W = C_2 \cdot t^{0,24} \cdot v^{-0,56} \cdot S^{9,48} \cdot \varphi^{0,70} \cdot \alpha^{-0,19} \cdot \gamma^{-0,63} \cdot \rho_1^{0,29} \cdot r^{-0,30};$$

$$C_2 = 1,2 \cdot 10^{-6};$$

– при обработке ХН77ТЮР

$$W = C_3 \cdot t^{0,24} \cdot v^{-0,56} \cdot S^{9,67} \cdot \varphi^{0,70} \cdot \alpha^{-0,19} \cdot \gamma^{-0,63} \cdot \rho_1^{0,29} \cdot r^{-0,29};$$

$$C_3 = 111,5 \cdot 10^{-6};$$

– при обработке ВТЗ-1

$$W = C_4 \cdot t^{0,24} \cdot v^{-0,56} \cdot S^{9,97} \cdot \varphi^{0,70} \cdot \alpha^{-0,19} \cdot \gamma^{-0,62} \cdot \rho_1^{0,29} \cdot r^{-0,30};$$

$$C_4 = 31,2 \cdot 10^{-6};$$

где W – удельная накопленная энергия, Дж/мм³; t – глубина резания, мм ($t = 0,8 \dots 3$ мм); v – скорость резания, м/мин (при обработке стали 15 и стали 45 $v = 180 \dots 280$ м/мин, ХН77ТЮР и ВТЗ-1 – $v = 10 \dots 95$ м/мин); S – подача, мм/об. ($S = 0,11 \dots 0,45$ мм/об.); φ – главный угол в плане, град ($\varphi = 45 \dots 60^\circ$); α – задний угол резца, град ($\alpha = 6 \dots 12^\circ$); γ – передний угол резца, град ($\gamma = 6 \dots 12^\circ$); ρ_1 – радиус округления режущей кромки резца, мкм ($\rho_1 = 18 \dots 30$ мкм); r – радиус при вершине резца в плане, мм ($r = 0,5 \dots 1,5$ мм).

Рис. 5. Зависимости накопленной энергии деформации от скорости резания для стали 15 (в двойных логарифмических координатах)

($t = 0,8$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\rho_1 = 30$ мкм; $\Delta_{\text{изн}} = 20$ мкм):

1 – $S = 0,45$ мм/об., $W = 1,4014v^{-0,56}$; 2 – $S = 0,4$ мм/об., $W = 1,2108v^{-0,56}$;
 3 – $S = 0,35$ мм/об., $W = 1,0326v^{-0,56}$; 4 – $S = 0,3$ мм/об., $W = 1,8588v^{-0,56}$;
 5 – $S = 0,23$ мм/об., $W = 0,6304v^{-0,56}$; 6 – $S = 0,15$ мм/об., $W = 0,3733v^{-0,56}$;
 7 – $S = 0,11$ мм/об., $W = 0,2624v^{-0,56}$

Коэффициенты C_1 – C_4 предположительно характеризуют способность материала сопротивляться пластическому деформированию и разрушению в процессе обработки и непосредственно связаны с его механическими свойствами, такими как предел прочности σ_B ; условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ с допуском на величину пластической деформации при нагружении 0,2 %, относительное удлинение δ .

Математически данные свойства можно представить в виде безразмерного комплекса $\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta}$ [10]. Установим математическую и графическую зависимости коэффициентов C_1 – C_4 от безразмерного комплекса $\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta}$ каждого из рассматриваемых материалов, которую обозначим C и для получения которой может быть использована степенная аппроксимация значений коэффициентов C_1 – C_4 . Данная зависимость представлена на рис. 6 в двойных логарифмических координатах.

Рис. 6. Зависимость коэффициента C от безразмерного комплекса $\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta}$ ($C = 2 \cdot 10^{-7} x^{2,17}$; $R^2 = 0,8859$)

Из математических уравнений для определения удельной накопленной энергии деформации в зависимости от параметров процесса резания видно, что показатели степеней для различных параметров одинаковы для всех обрабатываемых материалов, что позволяет получить универсальную зависимость для всех материалов. Зависимость для коэффициента C от механических свойств материалов также позволяет привести формулы для определения удельной накопленной энергии к единому виду:

$$W = 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-2,17} \cdot t^{0,24} \cdot v^{-0,56} \cdot S^{9,66} \cdot \varphi^{0,70} \cdot \alpha^{-0,19} \cdot \gamma^{-0,62} \cdot \rho_1^{0,29} \cdot r^{-0,30}. \quad (9)$$

Полученное выражение (9) позволяет рассчитывать удельную накопленную энергию деформации в зависимости от режимов токарной обработки и параметров геометрии режущей части резца для любого обрабатываемого материала.

Результаты получены в рамках выполнения базовой части государственного задания Минобрнауки России (НИР 824).

Библиографический список

1. Драпкин Б.М., Кононенко В.К., Безъязычный В.Ф. Свойства сплавов в экстремальном состоянии. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.
2. Проблемные вопросы упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов при пластической деформации и представление о наклепе / В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин, М.А. Прокофьев, М.В. Тимофеев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 1. – С. 3–6.
3. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
4. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
5. Безъязычный В.Ф. Взаимосвязь технологических условий обработки с параметрами качества поверхностного слоя, модулем упругости и пределом выносливости детали // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 9. – 18 с.
6. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, Т.Д. Кожина, А.В. Константинов [и др.]. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 184 с.
7. Безъязычный В.Ф. Разработка теоретических основ технологического обеспечения качества и эффективности механической обработки деталей авиационных двигателей: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1982. – 533 с.
8. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крылов, В.А. Полетаев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – Ч. 1. – 560 с.

9. Безъязычный В.Ф., Рыкунов Н.С., Водолагин А.Л. Влияние технологических условий механической обработки на предел выносливости деталей газотурбинных двигателей. – Рыбинск: Изд-во Рыбинск. гос. авиац. техн. ун-та, 2007. – 34 с.

10. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.

References

1. Drapkin B.M., Kononenko V.K., Bezyazichny V.F. Svoystva splavov v ekstremalnom sostoyanii [The properties of alloys in extreme condition]. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 256 p.

2. Bezyazichny V.F., Drapkin B.M., Prokofyev M.A., Timofeev M.V. Problemnye voprosy uprochneniya poverkhnostnykh sloev metallov i splavov pri plasticheskoy deformatsii i predstavlenie o naklepe [Problematic issues of hardening of the surface layers of metals and alloys during plastic deformation and the notion of cold work]. *Uprochnayushkiye tehnologii i pokrytiya*, 2005, no. 1, pp. 3-6.

3. Sulima A.M., Evstigneev M.I. Kachestvo poverkhnostnogo sloya i ustalostnaya prochnost detaley iz zharoprochnykh splavov [The quality of the surface layer and the fatigue strength of parts made of superalloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 256 p.

4. Starkov V.K. Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 640 p.

5. Bezyazichny V.F. Vzaimosvyaz tekhnologicheskikh usloviy obrabotki s parametrami kachestva poverkhnostnogo sloya, modulem uprugosti i predelom vynoslivosti detali [Interrelation with the technological conditions of processing quality parameters of the surface layer, the modulus of elasticity and endurance limit details]. *Prilozhenie. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2003, no. 9. 18 p.

6. Bezyazichny V.F., Kozhina T.D., Konstantinov A.V. [et al.]. Optimizatsiya tekhnologicheskikh usloviy mekhanicheskoy obrabotki detaley aviatsionnykh dvigateley [Optimization of technological conditions of machining aircraft engine parts]. Moskovskiy aviatsionnyy institut, 1993. 184 p.

7. Bezyazichny V.F. Razrabotka teoreticheskikh osnov tekhnologicheskogo obespecheniya kachestva i effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki detaley aviatsionnykh dvigateley [The development of the theoretical foundations of the process to ensure quality and efficiency of machining air-

craft engines]. Doctor's degree dissertation. Moskovskiy aviatsionnyy institut, 1982. 533 p.

8. Bezyazichny V.F., Krylov V.N., Poletaev V.A. [et al.]. Avtomatizatsiya tekhnologii izgotovleniya gazoturbinnnykh aviatsionnykh dvigateley [Automation technology of gas turbine aircraft engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005. 560 p.

9. Bezyazichny V.F., Rykunov N.S., Vodolagin A.L. Vliyaniye tekhnologicheskikh usloviy mekhanicheskoy obrabotki na predel vynoslivosti detaley gazoturbinnnykh dvigateley [Influence of technological conditions of machining on the endurance limit of components of gas turbine engines]. Rybinskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskiy universitet imeni P.A. Soloveva, 2007. 34 p.

10. Bezyazichny V.F. Metod podobiya v tekhnologii mashinostroyeniya [Similarity method in engineering technology]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2012. 320 p.

Об авторах

Безязычный Вячеслав Феоктистович (Рыбинск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения» ФГБОУ ВПО РГТУ им. П.А. Соловьева (152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53, e-mail: technology@rsatu.ru).

Прокофьев Максим Алексеевич (Рыбинск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения» ФГБОУ ВПО РГТУ им. П.А. Соловьева (152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53, e-mail: rgata2004@mail.ru).

Виноградова Наталья Владимировна (Ярославль, Россия) – кандидат технических наук, инженер ООО «КРОНЕ Инжиниринг» (150040, г. Ярославль, ул. Победы, д. 37, оф. 401, e-mail: frostiest@list.ru).

About the authors

Vyacheslav F. Bezyazychnyy (Rybinsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Aircraft Engine Technology and General Engineering, P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University (53, Pushkina st., Rybinsk, 152934, Russian Federation, e-mail: technology@rsatu.ru).

Maksim A. Prokofev (Rybinsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aircraft Engine Technology and General Engineering, P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University (53, Pushkina st., Rybinsk, 152934, Russian Federation, e-mail: rgata2004@mail.ru).

Natalya V. Vinogradova (Yaroslavl, Russian Federation) – Engineer, LLC “KROHNE Engineering” (of. 401, 37, Pobedy st., Yaroslavl, 150040, Russian Federation, e-mail: frostiest@list.ru).

Получено 21.07.2015