

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2009 В. А. Барвинок, М. А. Вишняков, С. А. Игнатьев

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье представлена методика теоретического определения температурных полей при термопластическом упрочнении. В качестве примера показаны результаты расчётов для одностороннего охлаждения крупногабаритной детали типа диска турбины ГТД. Приведено сопоставление расчетных и экспериментальных температурных полей.

Упрочнение термопластическое, температурные поля, деформации, напряжения остаточные

Анализ технологических методов упрочняющей обработки показал, что для повышения сопротивления усталости и долговечности деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных и титановых сплавов, работающих длительное время при повышенных температурах, необходим такой способ упрочнения, который обеспечил бы в поверхностном слое благоприятные сжимающие остаточные напряжения при минимальной степени деформационного упрочнения. Таким методом, удовлетворяющим вышеуказанным условиям, является термопластическое упрочнение (ТПУ), основанное на образовании поверхностных сжимающих напряжений за счёт неравномерного распределения температуры по сечению детали. С целью теоретического определения теплонапряженного состояния в поверхностном слое изделия возникла необходимость в разработке математической модели процесса термопластического упрочнения.

В настоящее время в теории термопластичности существует ряд методов [1,2], позволяющих осуществить расчёт напряженного состояния в пластически деформированной детали. Для решения технических проблем различного типа целесообразно пользоваться некоторыми частными вариантами теории термопластичности, позволяющими решить конкретную задачу наиболее простыми средствами и вместе с тем достаточно полно и правильно описать важнейшие стороны данного явления. Учитывая особенности процесса ТПУ, происходящие при нагреве и ускоренном охлаждении, при

расчёте теплонапряженного состояния детали применена теория неизотермического пластического течения с анизотропным упрочнением.

Теоретический анализ процесса термопластического упрочнения сводится к последовательному решению двух основных задач: нестационарной теплопроводности и неизотермического упругопластического деформирования тела.

Процесс нестационарной теплопроводности в твёрдом теле применительно к процессу термоупрочнения можно представить соответствующим дифференциальным уравнением теплопроводности для элементарного объёма [3]:

$$\rho c \frac{dT}{dt} + \{L\}^T \{q\} = 0, \quad (1)$$

где ρ - плотность; c - теплоёмкость; T - температура; $\{q\}$ - вектор теплового потока; $\{L\}^T$ - транспонированный вектор-оператор; t - время.

Используя закон Фурье, выражение для теплового потока можно представить в виде

$$\{q\} = -[D]\{L\}T, \quad (2)$$

где $[D]$ - матрица теплопроводности.

С учётом (2) уравнение (1) преобразуется к виду

$$\rho c \dot{T} = [L]^T ([D]\{L\}T). \quad (3)$$

В случае термопластического упрочнения коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости зависят от температуры, поэтому дифференциальное уравнение (3) является нелинейным.

Начальными условиями при решении уравнения (3) является температурное поле в начальный момент времени - перед охлаждением при ТПУ:

$$T_0 = T_0(X, Y, Z, t_0).$$

Граничные условия на поверхности, где осуществляется интенсивное охлаждение, выражаются законом Ньютона для конвективной теплопередачи:

$$\{q\}^T \{n\} = h(T_s - T_B), \quad (4)$$

где $\{n\}$ - единичный вектор внешней нормали к поверхности; $h = h(t)$ - коэффициент теплоотдачи; T_s - температура поверхности тела; T_B - средняя температура окружающей среды.

Уравнения (3) - (4) решаются методом конечных элементов (МКЭ) [4]. Необходимые соотношения МКЭ получаются в вариационной форме. В качестве весовой функции берётся вариация температуры δT . После соответствующих преобразований (3) с учетом (4) получим

$$\int_{V_e} \left(\rho c \delta T \frac{dT}{dt} + \{L\}^T \delta T ([D]\{L\}T) \right) dV = \int_{S_e} \delta T h (T_B - T_s) dS.$$

Переменная в пространстве и времени температура T аппроксимируется через узловые значения $\{T_e\}$ с помощью функций формы элемента $\{N\} = \{N(X, Y, Z)\}$:

$$T = \{N\}^T \{T_e\}.$$

Применяя необходимые математические приёмы, уравнение нестационарной теплопроводности для элементарного объёма можно представить в матричной форме:

$$\left[C_e \right] \{\dot{T}_e\} + \left[K_e \right] \{T_e\} = \{Q_e\},$$

где $\left[C_e \right]$ - матрица теплоёмкости элемента;

$\left[K_e \right]$ - матрица теплопередачи элемента, в которую входят матрицы теплопроводности

$\left[K_e^{t_B} \right]$ и конвективной теплоотдачи элемента $\left[K_e^{t_c} \right]$; $\{Q_e\}$ - вектор конвективного поверхностного теплового потока элемента; $\{T_e\}$ - вектор узловых температур.

Для указанной модели разрешающая система дифференциальных уравнений метода конечных элементов будет иметь вид

$$\left[C \right] \{\dot{T}\} + \left[K \right] \{T\} = \{Q\}, \quad (5)$$

где $\left[C \right]$ и $\left[K \right]$ - глобальные матрицы теплоёмкости и теплопроводности, $\{Q\}$ - глобальный вектор узловых тепловых потоков.

Для решения системы уравнений (5) используется конечноразностное выражение

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1 - \Theta) \Delta t \{\dot{T}_n\} + \Theta \Delta t \{\dot{T}_{n+1}\}, \quad (6)$$

где Θ - параметр Эйлера, лежащий в диапазоне $0,5 \leq \Theta \leq 1$; $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ - шаг времени. При $\Theta = 0,5$ имеет место схема интегрирования Кранка-Никольсона.

Подставляя $\{\dot{T}_{n+1}\}$ из (6) в (5), получим

$$\left(\frac{1}{\Theta \Delta t} \left[C \right] + \left[K \right] \right) \{T_{n+1}\} = \{Q\} + \left[C \right] \left(\frac{1}{\Theta \Delta t} \{T_n\} + \frac{1 - \Theta}{\Theta} \{\dot{T}_n\} \right). \quad (7)$$

Схема (7) позволяет последовательно по шагам времени определить узловые температуры на заданном отрезке времени.

Так как теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи при термомеханическом упрочнении зависят от температуры, которая изменяется во времени, то система уравнений (7) нелинейна. При условии баланса тепловых потоков в узлах конечных элементов модели её можно представить в виде разрешающей системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\left[\bar{K}(T) \right] \{T\} = \left\{ \bar{Q}(T) \right\}, \quad (8)$$

где $\left[\bar{K}(T) \right]$ - эквивалентная матрица теплопроводности; $\left\{ \bar{Q}(T) \right\}$ - эквивалентные узловые тепловые потоки; $\{T\} = \{T_{n+1}\}$ - значе-

ния узловых температур на $n+1$ шаге времени.

Решение матричного уравнения (8) производится итерационным методом Ньютона-Рафсона [4]. Это уравнение представляется в виде вектора остаточного потока

$$\{\Phi(T)\} = \{\bar{Q}(T)\} - [\bar{K}(T)]\{T\} = 0.$$

Алгоритм итерационного процесса решения данного уравнения указанным методом основан на разложении $\{\Phi(T)\}$ в ряд Тейлора. Итерационный процесс повторяется до тех пор, пока разность узловых температур на соседних итерациях не будет удовлетворять соотношению

$$\left\{ \Delta T_i \right\} \ll \varepsilon$$

для некоторого заранее выбранного малого допуска ε . При первой итерации в качестве нулевого приближения можно взять результат решения системы уравнений (7) при значении теплофизических параметров в момент T_n .

Полученные на каждом временном шаге узловые температуры служат исходными данными для последующего анализа напряженно-деформированного состояния тела при термопластическом упрочнении.

Расчёт теплового состояния проводился в ANSYS на примере термопластического упрочнения ёлочного паза диска турбины при условии его одностороннего спрейерного охлаждения. Данная задача решалась в трёхмерной постановке. В качестве модели был взят выступ между двумя пазами и часть диска, по величине соизмеримая с размерами паза. Поверхности, к которым граничные условия не прикладываются, считаются адиабатическими (без теплообмена). Тепловой анализ проводился для конечноэлементной модели с 17888 элементами и 20988 узлами при условии, что коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ прикладывается равномерно к торцу и боковым поверхностям.

Моделирование нагрева выступа ёлочного паза осуществлялось путем приложения к узлам модели температуры нагрева, равной 700°C . Это был первый шаг решения. Поскольку минимальное время интенсивного охлаждения при ТПУ составляет

3...4 с, далее к торцовой и боковой поверхностям прикладывалась тепловая нагрузка, которая действовала 3 с. В течение этого времени коэффициент теплоотдачи изменялся в соответствии с известной зависимостью для исследуемого материала. Для обеспечения необходимой точности теплового расчёта интервал времени 3 с был разбит на шаги и подшаги. Перед следующими шагами нагружения (после 3 с) коэффициент теплоотдачи удалялся, и к тем же поверхностям прикладывалась постоянная величина $\alpha(T)$, равная $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, что соответствует свободной конвекции. Время окончания расчёта выбиралось из условия равномерного охлаждения всего паза до температуры, близкой к температуре окружающей среды.

При проведении теплового расчёта была также учтена зависимость свойств материала (модуля упругости, коэффициента линейного расширения и т.д.) от температуры. Расчёты приведены для диска турбины, изготовленного из жаропрочной стали 20X12ВНМФ.

На рис.1 представлен образец с указанием контрольных точек, для которых выполнен расчёт температурных полей. Точки 1, 2 и 3 расположены на верхней стороне выступа паза диска на глубине 4 мм, а точки 4 и 5 – на его боковых поверхностях.

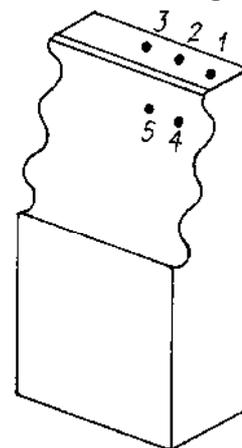


Рис.1. Образец для исследования температурных полей

На рис. 2 показаны результаты расчёта температуры в контрольных точках выступа диска в течение 0,2 с охлаждения. Видно, что в точках 4 и 5, расположенных непосредственно на поверхности одной из боковых сторон выступа, падение температуры

происходит наиболее интенсивно и составляет $\Delta T = 540^\circ\text{C}$. Время, за которое произошло резкое падение температуры, составило $\tau = 0,03\text{c}$. В дальнейшем темп охлаждения снизился и произошло плавное уменьшение температуры до 110°C . В то же время (за 0,2 с) в точках 1, 2 и 3 температура практически не изменилась.

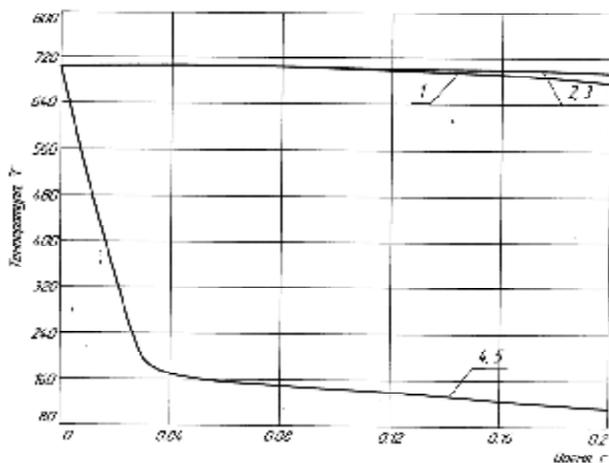


Рис.2. Изменение температуры в контрольных точках выступа за 0,2 с спрейерного охлаждения

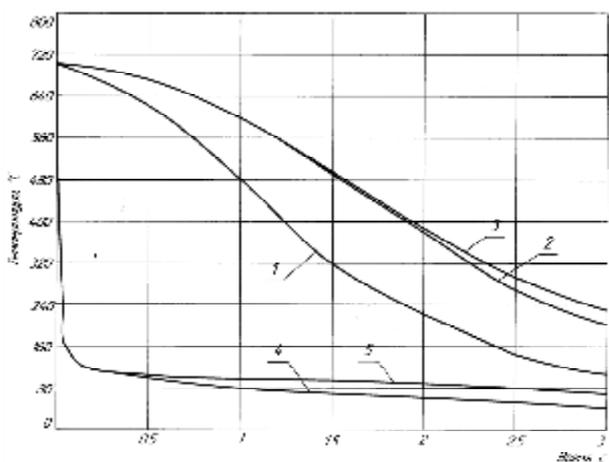


Рис.3. Изменение температуры за 3 с спрейерного охлаждения

С целью получения полной картины изменения температурных полей за весь период спрейерного охлаждения был выполнен соответствующий расчёт, результаты которого можно наблюдать на рис. 3.

Видно, что если к 0,2 с поверхность охлаждалась до 110°C , то сердцевина паза к этому времени только начинает охлаждаться (точки 1, 2 и 3). Однако к концу расчетного периода в связи с продолжающимся интенсивным охлаждением поверхности детали происходит мощный отток тепла из ее сердцевины. Этот процесс характеризуется соот-

ветствующим понижением температуры: в контрольных точках 2 и 3 температура составила $210...230^\circ\text{C}$, а в точке 1 - 120°C . При этом температура на поверхности детали составляет $55...70^\circ\text{C}$ (точки 4 и 5).

Процесс окончательного остывания паза можно проследить на рис.4. Картина, наблюдаемая на нём, показывает, что после 800 с начинается интенсивное уменьшение температур на поверхности и внутри детали, а к 24800 с этап окончательного её остывания заканчивается, и общая температура составляет 27°C . Видно, что в ходе процесса охлаждения температуры во всех точках модели постепенно сблизились и разница между ними исчезла.

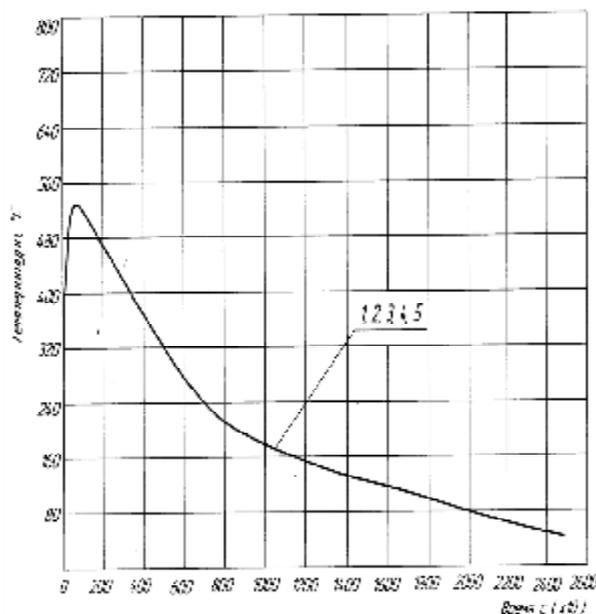


Рис.4. Изменение температуры выступа ёлочного паза за 24800 с охлаждения

Практика исследования процесса термопластического упрочнения свидетельствует о том, что напряжённое состояние, создаваемое в поверхностном слое детали, в значительной степени определяется интенсивностью охлаждения её поверхности. При этом достоверность расчётов тепловых полей, имеющих место при охлаждении упрочняемой детали, существенным образом влияет на результаты расчёта остаточных напряжений. Одним из важных факторов, подтверждающих корректность выбираемых физической и математической моделей для расчёта теплонапряженного состояния в поверхностном слое термоупрочняемой дета-

ли, является идентичность температурных полей, получаемых экспериментальным и расчётным методами.

Для выполнения поставленной задачи был подготовлен специальный образец, вырезанный из ободной части диска турбины, изготовленный из жаропрочной стали 20Х12ВНМФ и представляющий собой выступ паза диска, в который по определённой схеме были установлены хромель-алюмелевые термопары (рис.1). Их расположение непосредственным образом связано с тем, что при термоупрочнении указанного элемента реализуется схема одностороннего охлаждения, в соответствии с которой торец, боковые стороны («елка») и верхняя часть выступа равномерно прогревались на определённую глубину до соответствующей температуры. После этого указанные поверхности подвергались спрейерному охлаждению водой.

Замер температуры в контрольных точках выступа паза при его нагреве проводился с помощью электронного автоматического потенциометра ЭПИ-09, который работал в комплекте с термопарами «ХА». Для замера температуры при интенсивном охлаждении образца использовался шлейфовый осциллограф К20-22, укомплектованный гальванометрами НУ-8459.

После расшифровки термограмм были построены графики изменения температуры в зависимости от времени охлаждения (рис.5). При построении зависимости $T = f(\tau)$ были приняты во внимание данные для термопар 1,2,3,4 и 5. Из графиков видно, что наиболее интенсивное охлаждение происходит на поверхности образца (термопары 4 и 5). Градиент температур за 0,1 с для них составил $\Delta T = 560^\circ\text{C}$. В дальнейшем процесс протекал плавно, о чём свидетельствует характер расположения кривой. Термопара 1, установленная в отверстии глубиной 4 мм и на расстоянии 3 мм от переднего торца образца, характеризует постепенное понижение температуры. За 0,1 с перепад ΔT составил 125°C , а с 0,1 до 0,8 с эта величина практически мало изменилась ($\Delta T = 150^\circ\text{C}$). Термопары 2 и 3, установленные соответственно на расстоянии 9 и 15 мм от переднего торца образца, за 0,8 с охлаждения показали несущественное изменение температуры.

Необходимо также отметить, что, как показала практика, для обеспечения наибольшего эффекта теплоотдачи при термопластическом упрочнении жаропрочных сталей и сплавов давление охлаждающей жидкости должно составлять не менее $P = 0,48 \dots 0,50$ МПа.

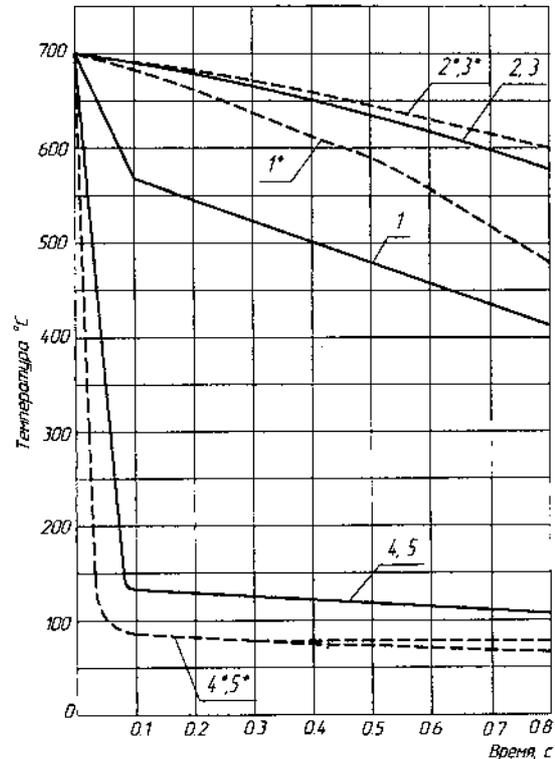


Рис. 5. Результаты исследования температурных полей при спрейерном охлаждении. Давление охлаждения $P = 0,48 - 0,50$ МПа 1,2,3,4,5-контрольные точки замеров при экспериментальном исследовании; 1*,2*,3*,4*,5*-расчётные контрольные точки замеров

Сопоставление расчётных и экспериментальных зависимостей (рис.5), показывает, что они практически мало отличаются для контрольных точек, расположенных вблизи охлаждаемых поверхностей (точки 4 и 5) и имеют достаточно существенную разницу для термопар, расположенных в глубине детали (точки 1, 2 и 3). Учитывая, что формирование напряженного состояния детали в результате термопластического упрочнения происходит в относительно тонком поверхностном слое, то имеющиеся отличия в теоретических и экспериментальных данных для 4 и 5 термопар не окажут влияние на достоверность последующих расчетов. Термопары 1, 2 и 3, расположенные соответственно на расстоянии 3, 9 и 15 мм от охлаждаемого торца, главным образом предназначены для контроля процесса нагрева, кото-

рый должен происходить таким образом, чтобы обеспечить равномерный прогрев детали на соответствующую глубину. В этом случае главным показателем является минимальная разница в температурах между показаниями всех термопар, установленных по объёму детали. Как показали результаты термометрирования, указанная разница на заключительном этапе процесса нагрева не превышает 30°C.

Таким образом, представленная методика теоретического определения температурных полей при термопластическом упрочнении достаточно точно отражает многие особенности процесса ТПУ, свойства материала детали, её геометрии и т.д. и может явиться основой для последующего расчёта напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали.

Библиографический список

1. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности [Текст] / Л.М. Качанов – М.: Наука, 1969. – 420 с.

2. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст] / Н.Н. Малинин – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

3. Биргер, И.А. Теория пластического течения при неизотермическом нагружении [Текст] / И.А. Биргер // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. - 1964. - №1. - С.193-196.

4. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич – М.: Мир, 1975. – 541 с.

References

1. Kachanov, L.M. Bases of the theory of plasticity [Text] / L.M. Kachanov – M.: Science, 1969. – 420 p.

2. Malinin, N.N. The applied theory of plasticity and creep [Text] / N.N. Malinin – M.: Mechanical engineering, 1975. – 400 p.

3. Birger, I.A. The theory of a plastic current at not isothermal нагружении [Text] / I.A. Birger // Mechanics and mechanical engineering. - 1964. - №1. - P.193-196.

4. Zenkevich, O. Method of final elements in the technician [Text] / O. Zenkevich – M.: World , 1975. – 541 p.

THEORETICAL DEFINITION OF TEMPERATURE FIELDS AT THERMOPLASTIC HARDENING OF DETAILS OF GAS TURBINE ENGINES

©2009 V. A. Barvinok, M. A. Vishnyakov, S. A. Ignatiev

Samara State Aerospace University

In work the technique of theoretical definition of temperature fields at thermoplastic hardening is presented. As an example results of calculations for unilateral cooling of a large-sized detail of type of a disk of the turbine of gas turbine engines are shown. Comparison of settlement and experimental temperature fields is resulted.

Hardening thermoplastic, temperature fields, deformations, pressure residual

Информация об авторах

Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: barvinok@ssau.ru. Область научных интересов: физика плазмы, математическое моделирование, тепловые процессы, деформационные процессы, газотермическое напыление, вакуумное напыление, надежность, ресурс, авиакосмическая техника.

Вишняков Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: bogdanovich@ssau.ru. Область науч-

ных интересов: высоконагруженные детали, термопластическое упрочнение, сопротивление усталости, качество поверхностного слоя, дислокационные основы управления.

Игнатьев Сергей Александрович, аспирант кафедры производства летательных материалов и управление качеством в машиностроении Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: bogdanovich@ssau.ru. Область научных интересов: термопластическое упрочнение, качество поверхностного слоя.

Barvinok Vitaly Alekseevich, Corresponding Member of the RAS, Doctor of Technical Scientific, professor, chief of the Department of air and space craft manufacture and quality management in engineering at Samara State Aerospace University. E-mail: barvinok@ssau.ru. Area of research: Physics of plasma, mathematical modelling, thermal processes, deformation processes, gas-thermal spraying, vacuum spraying, reliability, a resource, the avia-space technics.

Vishnyakov Mihail Anatolevich, Doctor of Technical Scientific, professor of the Department of air and space craft manufacture and quality management in engineering at Samara State Aerospace University. E-mail: bogdanovich@ssau.ru. Area of research: highly loaded details, thermoplastic hardening, resistance of weariness, quality of a blanket, dislocation bases of management.

Ignatiev Sergey Aleksandrovich, Postgraduate student of department of production aircraft and quality management in mechanical engineering of Samara state aerospace university. E-mail: bogdanovich@ssau.ru. Area of research: thermoplastic hardening, quality of a blanket.