

УДК 621.78

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2010 М.А.Вишняков<sup>1</sup>, В.И.Богданович<sup>1</sup>, К.В.Прокопович<sup>2</sup>, Е.Г.Громова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 14.05.2010

В статье рассматриваются особенности формирования микроструктуры поверхностного слоя лопаток компрессора и турбины ГТД из жаропрочных и титановых сплавов в результате их термопластического упрочнения.

Ключевые слова: Упрочнение термопластическое, поверхностный слой; жаропрочные и титановые сплавы

В газотурбинных двигателях (ГТД) наиболее нагруженными деталями являются рабочие лопатки компрессора и турбины. Они работают в условиях высоких и переменных температур и агрессивной газовой среды. В материале лопатки возникают большие напряжения растяжения от центробежных сил и значительные вибрационные напряжения изгиба и кручения от газового потока. Быстрая и частая смена температуры приводит к возникновению в лопатках значительных термических напряжений.

Многочисленная статистика дефектов показывает, что преждевременное разрушение лопаток компрессора и турбины обычно носит усталостный характер. При этом источник появления усталостной трещины очень часто располагается в поверхностном слое детали. Это, в частности, связано с тем, что поверхностные слои оказываются наиболее нагруженными при всех видах напряженного состояния и подвергаются активному воздействию внешней среды. Учитывая отмеченные особенности, качество поверхностного слоя лопаток компрессора и турбины ГТД значительным образом влияет на сопротивление их материала усталостному разрушению.

Сопротивление усталости большинства ответственных и высоконагруженных деталей двигате-

ля можно повысить металлургическими, конструктивными, технологическими и эксплуатационными методами. Установлено, что технологические методы являются наиболее эффективными.

В настоящее время в производстве нашли широкое применение технологические методы упрочняющей обработки, основанные на поверхностном пластическом деформировании (ППД). Как отмечают большинство исследователей [1, 2], указанные методы не всегда дают необходимый эффект повышения сопротивления усталости в отношении деталей, работающих при высоких температурах. Для деталей, находящихся при работе в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок, более целесообразно применение упрочняющих методов, обеспечивающих в поверхностном слое минимальное деформационное упрочнение. Одним из таких методов является термопластическое упрочнение (ТПУ). Он заключается в том, что деталь вначале прогревается до температуры начала термопластических деформаций, а затем ее поверхности подвергаются высокоскоростному охлаждению. Результатом применения метода является формирование в поверхностном слое детали сжимающих остаточных напряжений значительной величины и глубины залегания. При этом наибольшие значения напряжений располагаются непосредственно на поверхности детали.

Прежде чем рассматривать процессы, протекающие в поверхностных слоях детали, подвергнутой термопластическому упрочнению, необходимо оценить параметры, которые характеризуют ее состояние, и по изменению которых можно судить о происходящих явлениях. Указанные показатели должны характеризовать геометрию, напряженное состояние и структуру поверхностного слоя. В данной статье рассматриваются вопросы формирования микроструктуры

---

*Вишняков Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru.*

*Богданович Валерий Иосифович, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: bogdanovich@ssau.ru.*

*Прокопович Константин Васильевич, кандидат технических наук, доцент.*

*Громова Екатерина Георгиевна, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.*

поверхностного слоя рабочих лопаток из жаропрочных и титановых сплавов в результате ТПУ, а также ее связь с сопротивлением усталостному разрушению.

В газотурбинном двигателе большая часть деталей компрессора изготавливается из титановых сплавов. Так, для деталей ротора широкое распространение получили двухфазные  $\alpha + \beta$  - титановые сплавы типа ВТ9, а для деталей статора используют, например, сплавы типа ВТ20 на основе  $\alpha$  - структуры.

Проведенные ранее исследования показали, что для формирования оптимального уровня напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое лопаток из титановых сплавов необходимо в процессе их термопластического упрочнения соблюдать следующие режимы: для сплава ВТ9 температура нагрева должна составлять  $T=900^{\circ}\text{C}$ , а для эффективного охлаждения поверхности – использовать водяной душ (спрейерное охлаждение), который необходимо подавать на упрочняемую поверхность под давлением  $P=0,6$  МПа. Для сплава ВТ20 указанные режимы составляют:  $T=850^{\circ}\text{C}$ ,  $P=0,6$  МПа.

Для исследования микроструктуры титановых сплавов ВТ9 и ВТ20 до и после термопластического упрочнения применен металлографический метод. Эксперименты проводились на специальных шлифах после травления в следующем реактиве:  $10\% \text{HF} + 10\% \text{HNO}_3 + 80\% \text{H}_2\text{O}$ . Микроструктура выявлялась с помощью микроскопа МИМ-8М при 500-кратном увеличении на образцах, обработанных по двум вариантам: а) отжиг; б) отжиг + ТПУ. Режимы термопластического упрочнения:  $T=900^{\circ}\text{C}$  (ВТ9) и  $850^{\circ}\text{C}$  (ВТ20),  $\tau = 20$  мин,  $P=0,6$  МПа.

Микроструктура сплава ВТ9 в отожженном состоянии (рис. 1) представляет собой равноосную мелкозернистую структуру, состоящую из  $\alpha$  - фазы и из смеси  $\alpha$  и  $\beta$  - фаз. Микроструктура упрочненного образца (рис. 2) отличается большим содержанием  $\beta$  - фазы в поверхностном слое. Образовавшаяся  $\beta$  - фаза в связи с уменьшением концентрации  $\beta$  - стабилизирующих элементов становится метастабильной, проявляя склонность к распаду под воздействием рабочих температур и напряжений на смесь  $\alpha$  и  $\beta$  - фаз. Одна часть  $\beta$  - фазы распадается уже в процессе ускоренного охлаждения, другая - сохраняется в количестве примерно 25-30%.

Полученная в результате термопластического упрочнения микроструктура является наиболее эффективной для лопаток ротора компрессора ГТД из двухфазных титановых сплавов типа ВТ9, испытывающих значительные температурно-силовые нагрузки. Это связано с тем, что именно равноосный тип структуры обеспечива-

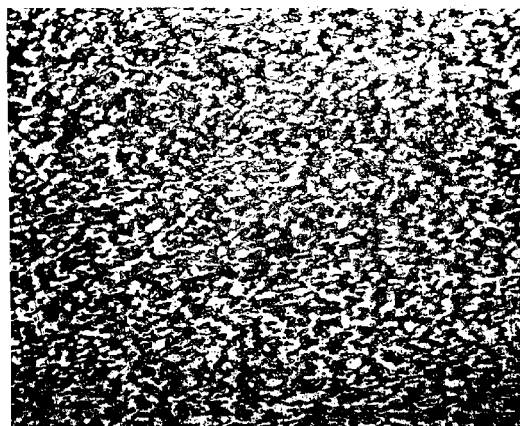


Рис. 1. Микроструктура отожженного образца из титанового сплава ВТ9. х 500

ет высокие значения выносливости и пластичности, а также термическую стабильность при рабочих температурах.

Микроструктура образцов из сплава ВТ20 отожженных и термоупрочненных практически не отличаются и имеют вид пластинчатой структуры, которая эффективна применительно к лопаткам статора компрессора ГТД.

Практика эксплуатации деталей из титановых сплавов показывает, что нагрев их выше температур полиморфного превращения приводит к образованию микроструктуры с пониженной хрупкой прочностью и очень низкой пластичностью. Это особенно вредно сказывается на работоспособности лопаток ГТД.

Для изучения влияния перегрева исследуемых сплавов ВТ9 и ВТ20 при термопластическом упрочнении на их микроструктуру, образцы из этих сплавов нагревались до температуры  $T = 1050^{\circ}\text{C}$ , превышающей температуру полиморфного превращения ( $T=1000 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ). В результате этого в поверхностном слое образцов из сплава ВТ9 (рис. 3) образуется равноосная микроструктура, состоящая из участков  $\alpha + \beta$  - фазы, а в сердцевине – крупные зерна  $\beta$  - фазы с грубоигольчатой внутризеренной структурой



Рис. 2. Микроструктура термоупрочненного образца из сплава ВТ9 ( $T=900^{\circ}\text{C}$ ). х 500

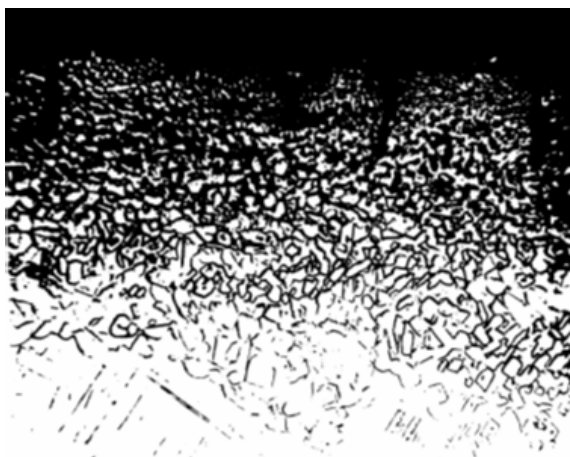


**Рис. 3.** Микроструктура термоупрочненного образца из сплава ВТ9 ( $T=1050^{\circ}\text{C}$ ).  $\times 500$

$\alpha'$ -фазой. Таким образом, ТПУ сплава ВТ9 при температуре, превышающей температуру аллотропического превращения, вызывает в процессе нагрева рост зерна первичной  $\beta$ -фазы и превращение ее в  $\alpha'$ -фазу в процессе охлаждения. При этом в условиях высокоскоростного охлаждения происходит измельчение крупного зерна  $\beta$ -фазы с превращением в  $\alpha + \beta$ -фазу в поверхностном слое.

Микроструктура сплава ВТ20 (рис. 4) характерна тем, что она в поверхностном слое представляет собой мелкодисперсную структуру  $\alpha$ -фазы, под которой располагаются более крупные равноосные зерна этой фазы. В сердцевине микроструктура крупнозернистая, состоящая из грубых пластин  $\alpha'$ -фазы.

Анализ микроструктуры исследуемых сплавов, упрочненных при повышенных температурах, показывает, что высокие скорости охлаждения, характерные для ТПУ, вызывают сильное дробление крупнозернистой структуры, полученной в результате перегрева, что определенным образом исправляет дефект перегретой



**Рис. 4.** Микроструктура термоупрочненного образца из сплава ВТ20 ( $T=1050^{\circ}\text{C}$ ).  $\times 500$

структуры. Особенностью структуры образцов, подвергнутых термопластическому упрочнению при температуре  $T=1050^{\circ}\text{C}$ , является также образование на поверхности этих образцов хрупкого альфирированного слоя, представляющего твердый раствор на основе  $\alpha$ -титана. В этом слое в процессе нагрева возникают высокие растягивающие напряжения, превышающие предел прочности материала, в результате чего образуются микротрещины глубиной до 35 мкм.

Не менее важную роль при изучении процесса термопластического упрочнения титановых сплавов играют вопросы их газонасыщения. Известно, что при нагреве на воздухе титановые сплавы образуют с атмосферными газами химические соединения – окалину, а также растворяют их. Проникновение кислорода, азота и водорода в поверхностный слой приводит к образованию твердых растворов внедрения, сильному упрочнению материала и резкому снижению пластичности. Это оказывает существенное влияние на механические свойства изделий из титановых сплавов [4].

Изменение физико-механических и технологических свойств титановых сплавов под влиянием кислорода определяются его воздействием на кристаллическую решетку металла. Проникновение кислорода в титан при образовании твердого раствора сильно искажает его решетку и значительно изменяет указанные свойства. При этом повышается твердость, снижается пластичность, что связано с влиянием кислорода на соотношение  $c/a$  гексагональной решетки титана. Данные рентгеноструктурного анализа показывают, что процесс окисления начинается уже при  $400^{\circ}\text{C}$ . Вместе с тем на основании результатов измерений микротвердости [3] установлено, что при температурах до  $500^{\circ}\text{C}$  кислород не растворяется в титане, а заметное растворение его начинается с  $550-600^{\circ}\text{C}$ . С ростом температуры до  $850-900^{\circ}\text{C}$  процесс диффузии кислорода в поверхностный слой титановых сплавов заметно интенсифицируется.

Многими исследователями отмечена высокая способность титановых сплавов к адсорбции водорода [1]. Содержание водорода выше критического количества приводит к охрупчиванию сплава. Это проявляется в снижении характеристик пластичности и в преждевременном хрупком разрушении при испытании на длительную прочность.

Несмотря на то, что обычная атмосфера имеет в своем составе много азота, лишь кислород у всех титановых сплавов значительно диффундирует в металл. Это вызвано более низкой скоростью диффузии азота в титане, а также меньшей прочностью нитрида титана по сравнению с

окислами. Фактически азот играет незначительную роль в процессе образования окалины и загрязнения поверхностного слоя металла при нагреве в атмосфере воздуха.

Высоколегированный кислородом охрупченный слой на титановых изделиях, снижая их пластические свойства, при эксплуатации деталей является причиной образования поверхностных трещин и разрушений.

Вместе с тем нагрев титановых сплавов до высоких температур (850-900) °С является неотъемлемым условием осуществления процесса термопластического упрочнения. Поэтому важно определить характер и глубину газонасыщенного слоя при ТПУ.

Исследование процесса проникновения газов в поверхностный слой отожженных и термоупрочненных образцов из сплавов ВТ9 и ВТ20 проводилось путем измерения микротвердости прибором ПМТ-3. Микротвердость измеряли от поверхности вглубь сечения с интервалом 5 мкм на глубину до 100 мкм и 10 мкм на глубину до 200 мкм. Температуры нагрева образцов при термопластическом упрочнении составляли:  $T=900$  °С (ВТ9) и 850 °С (ВТ20), а время нагрева – 20 мин. Распространение газонасыщенного слоя можно проследить по результатам замеров микротвердости. Установлено, что тонкий поверхностный слой термоупрочненных образцов имеет повышенные значения микротвердости, что свидетельствует о наличии газонасыщенного слоя. Однако величина этого слоя мала и не превышает 10 мкм.

Для определения газонасыщения при нагреве образцов до температуры, превышающей начало полиморфных превращений, они нагревались до температуры  $T=1050$  °С. При этом значения микротвердости в поверхностном слое сплавов ВТ9 и ВТ20 резко возросли, превысив первоначальные значения (до ТПУ) в 2-2,5 раза (рис. 5), а величина наиболее загрязненного слоя составила 25-30 мкм. Под ним расположен промежуточный слой толщиной примерно 70 мкм. Микротвердость сердцевин в термоупрочненных образцах несколько выше, чем в отожженных. Это связано с диффузией водорода, который способен проникать на значительную глубину.

Поскольку наличие газонасыщенного слоя отрицательно сказывается на усталостной прочности деталей из титановых сплавов, после термопластического упрочнения его необходимо удалить известными методами, в частности, полированием.

Для изготовления рабочих лопаток турбин нашел применение жаропрочный сплав на никелевой основе ЖС6КП. Он является промежуточным

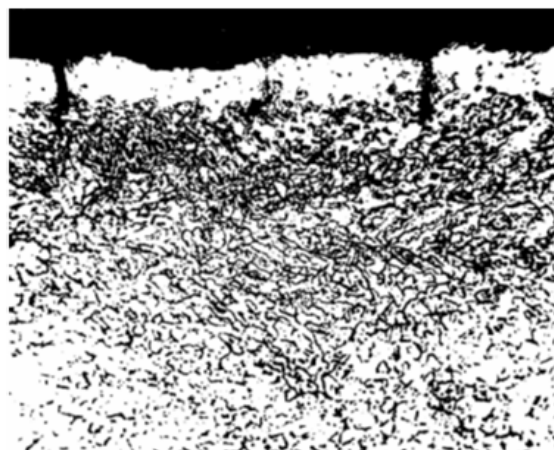


Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя титановых сплавов ВТ9 (а) и ВТ20 (б), термоупрочненных при температуре  $T=1050$  °С. х 500

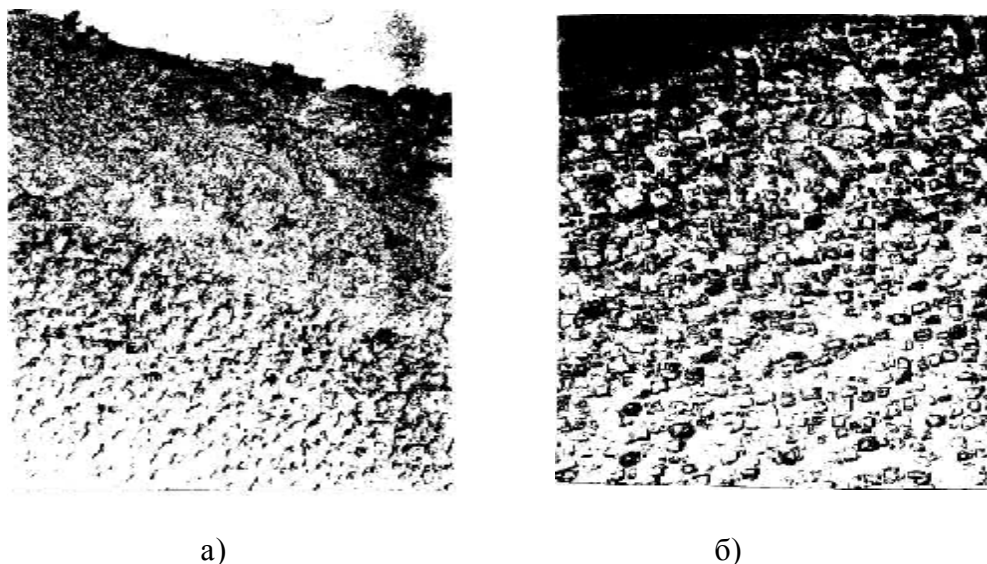
по свойствам между деформированными и литейными. Сплав предназначен для изготовления деталей, работающих при температуре 800-1050 °С.

Микроструктура сплава ЖС6КП после закалки и старения, а также после рекристаллизационного отжига представляет собой основу в виде  $\gamma$  – фазы, сравнительно крупные частицы  $\gamma'$  – фазы, образовавшиеся при кристаллизации, и более мелкие выделения  $\gamma'$  – фазы, сформированные при старении и имеющие почти кубическую форму.

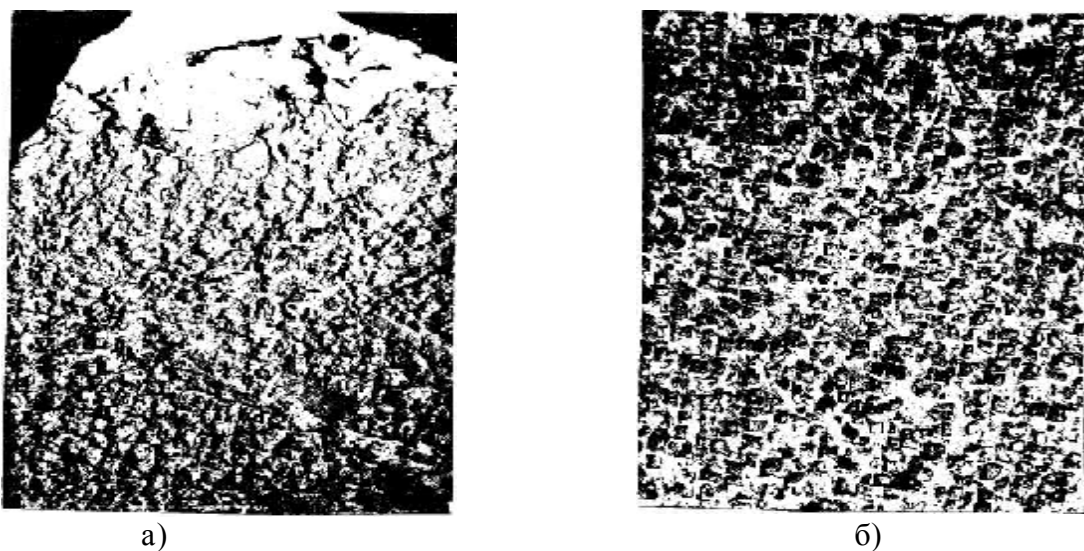
Сплав ЖС6КП является дисперсионно упрочняемым. При этом упрочняющей частью структуры является  $\gamma'$  – фаза, от количества, формы и распределения которой зависят прочностные и жаропрочные свойства. Исследования показали, что  $\gamma'$  – фаза располагается в матрице твердого раствора  $\gamma$  – фазы и на границах зерен.  $\gamma'$  – фаза, являясь максимальным препятствием для перемещения дислокаций, обеспечивает наибольшую длительную прочность при размере частиц 0,2-0,5 мкм и расстоянии между ними 0,05-0,5 мкм.

С целью выявления микроструктуры сплава ЖС6КП до и после термопластического упрочнения были проведены электронномикроскопические исследования. Для этой цели использовались образцы, вырезанные из пера рабочей лопатки турбины. За исходную была принята структура материала серийной лопатки, прошедшей отжиг в аргоне при температуре  $T=950$  °С в течение  $\tau = 2$  часов. На рис. 6 можно видеть микроструктуру сплава ЖС6КП.

После термопластического упрочнения на режиме  $T=750$  °С,  $\tau = 25$  мин,  $P=0,6$  МПа частицы  $\gamma'$  – фазы все более приобретают форму правильных геометрических фигур. Кроме того повышается плотность их взаимного расположения. Это можно видеть на рис. 7.



**Рис. 6.** Микроструктура поверхностного слоя отожженных лопаток из сплава ЖС6КП: а – поверхность, б – 150 мкм от поверхности



**Рис. 7.** Микроструктура поверхностного слоя лопаток из сплава ЖС6КП после ТПУ: а – поверхность, б – 150 мкм от поверхности. Режим ТПУ:  $T=750^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 25$  мин,  $P=0,6$  МПа

Таким образом на примере сплавов ВТ9 и ЖС6КП можно сделать вывод о том, что в одном случае (ВТ9) термопластическое упрочнение обеспечивает сохранение исходной оптимальной структуры, сформированной на этапе получения заготовки, а в другом (ЖС6КП) – структурное упрочняющее действие. Объединяющим для указанных сплавов является формирование в поверхностном слое детали сжимающих остаточных напряжений при минимальной степени деформационного упрочнения. Все это, в конечном итоге приводит к повышению сопротивления усталостной прочности материала детали, а, следовательно, ее долговечности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубровин И.Ф. Качество поверхностного слоя титановых сплавов при фрезеровании // *Авиационная промышленность*. 1970. №11. С.49-51.
2. Кураева В.П., Солонина О.П., Тхоревская Ж.Д. Влияние легирования на жаропрочность и термическую стабильность титановых сплавов // В кн.: *Структура и свойства титановых сплавов*. М.: ОНТИ ВИАМ, 1972. С.256-264.
3. Моисеев В.Н. Термическая обработка и механические свойства сплавов системы Ti-Mo-Al // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1962. №4. С.36-40.
4. Мороз Л.С., Разуваева И.Н., Ушков С.С. Особенности влияния алюминия на механические свойства титана // В кн.: *Новый конструкторский материал – титан*. М.: Наука, 1972. С.109-114.

## INFLUENCE OF THERMOPLASTIC HARDENING ON THE MICROSTRUCTURE OF HEAT RESISTING AND TITANIC ALLOYS

© 2010 M.A. Vishnyakov<sup>1</sup>, V.I. Bogdanovich<sup>1</sup>, K.V. Prokopovich<sup>2</sup>, E.G. Gromova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Samara State Technical University

In article features of formation of a microstructure of a blanket of blades of the compressor and the turbine of gas turbine engine from heat resisting and titanic alloys as a result of their thermoplastic hardening are considered.

Key words: Hardening thermoplastic, blanket; heat-resistant and titanic alloys

---

*Michael Vishnyakov, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru.*

*Valery Bogdanovich, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: bogdanovich@ssau.ru.*

*Constantine Prokopovich, Candidate of Technics, Associate Professor.*

*Ekaterina Gromova, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.*