



Двирная О. Э.,
Шумилов А. П.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГАЗОТУРБИННЫХ ДИСКОВ ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ОБРАБОТКИ

Представлены результаты исследования основных параметров качества обработанной поверхности замковых пазов в дисках турбин и компрессоров из стали ЭП517-Ш. Разработана физическая модель протягивания замковых пазов. В результате экспериментальных исследований установлены характер распространения остаточных напряжений, глубина и степень наклепа поверхностного слоя, предложена модель зависимости шероховатости обработанной поверхности от технологических факторов процесса протягивания.

Ключевые слова: технологические факторы, параметры качества, замковые пазы, физическая модель, высокопродуктивная технология.

1. Введение

Проблемы развития двигателестроения в судовой, авиационной, энергетической и других отраслях машиностроения могут быть решены путем внедрения новых материалов, современного высокопроизводительного оборудования и прогрессивных технологий.

Одним из ответственных этапов в производстве газотурбинных двигателей (ГТД) является обработка узлов крепления лопаток на ободу дисков. Обеспечение качественных замковых пазов позволяет повысить надежность узла крепления, тем самым свести к минимуму вероятность поломки хвостовой части лопаток, обода диска и ГТД в целом [1, 2].

Постоянное ужесточение основных характеристик газовых турбин приводит к необходимости создания новых жаропрочных материалов с повышенными физико-механическими свойствами. В настоящее время подавляющее большинство таких материалов производится за пределами Украины и имеет высокую цену. Перспективным направлением для повышения конкурентоспособности отечественного газотурбостроения является освоение материалов собственного производства — таких, как теплостойкая сталь 15X12H2MФВАБ-Ш (ЭП517-Ш). Она отвечает всем техническим требованиям и хорошо «работает» в условиях повышенных температур, вибраций, значительных циклических нагрузок, агрессивной среды. Кроме того, в ходе исследований было установлено, что ближайший аналог данного материала, российская сталь 15X16K5H2MФВАБ-Ш (ЭП866-Ш), после наработки в интервалах температур 420...470 °С и 570...600 °С подвержена интенсивному охрупчиванию с выпадением соединений Со и Сг по границам зерен, что приводит к снижению пластичности и ударной вязкости. Сталь ЭП517-Ш лишена этого недостатка, она более пластичная и жаропрочная, особенно заметный выигрыш по длительной прочности (> 20 %) в области температур 550...650 °С [3].

2. Постановка проблемы и анализ литературных данных

При внедрении стали ЭП517-Ш в производство дисков турбин и компрессоров установлено, что достичь

качественных обработанных поверхностей при использовании существующих технологий возможно лишь частично и только на прямолинейных участках замковых пазов незначительной длины. В большинстве случаев сохраняются недопустимые дефекты в виде ряби, надиров, наволакивания металла и др. (рис. 1).

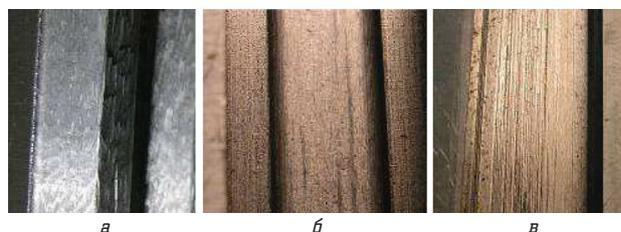


Рис. 1. Поверхность замковых пазов в дисках из стали ЭП517-Ш, обработанных в производственных условиях: а — ряби; б — наволакивание материала; в — надирсы металла

Низкое качество рабочих поверхностей пазов значительно ухудшает демпфирующую способность замковых соединений. Из-за колебаний лопаток возникают местные переменные контактные напряжения, которые становятся причиной формирования очагов усталостного разрушения и фреттинг-износа [4].

Поэтому исследование особенностей формирования качества поверхностного слоя для создания и внедрения высокопроизводительной технологии обработки замковых пазов является актуальной научной задачей, имеющей важное практическое значение для развития газотурбостроения при обеспечении сокращения импорта дорогостоящих жаропрочных материалов.

Известные в настоящее время работы по обработке жаропрочных материалов [1 — 5] содержат исследования, результаты которых могут быть применены при обработке новой стали ЭП517-Ш лишь частично из-за специфических свойств данного материала, они носят косвенный характер и направлены на решение узких сугубо производственных проблем. Так, до сих пор не создан научно обоснованный метод определения технологических условий обработки материала ЭП517-Ш, который бы обеспечивал формирование основных параметров качества поверхностей при увеличении произ-

водительности способа обработки. Вместе с тем, объемы использования данного материала отечественным газотурбостроением постоянно растут.

3. Исследование основных параметров качества поверхности замковых пазов из стали ЭП517-Ш

Целью работы является технологическое обеспечение основных параметров качества поверхностного слоя замковых пазов в дисках из стали ЭП517-Ш при увеличении производительности способа их обработки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

— исследовать основные параметры качества рабочих поверхностей замковых пазов в дисках из стали ЭП517-Ш, обработанных по традиционной технологии;

— создать способ и экспериментальные установки для исследования влияния повышенных скоростей резания на формирование основных параметров качества обработанных поверхностей замковых пазов из стали ЭП517-Ш;

— на основе экспериментальных результатов установить зависимости шероховатости поверхности, остаточных напряжений и упрочнения поверхностного слоя от технологических условий обработки стали ЭП517-Ш в диапазоне низких и повышенных скоростей резания;

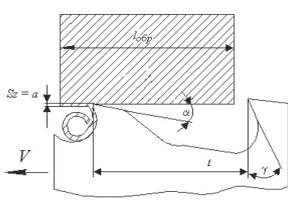
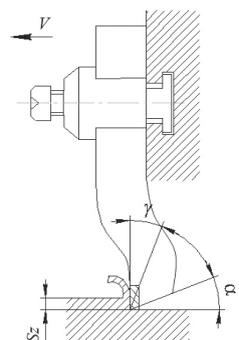
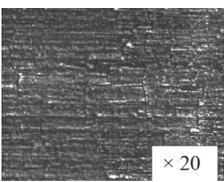
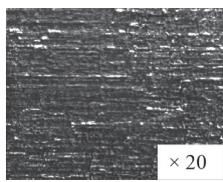
— разработать рекомендации по усовершенствованию технологического процесса обработки замковых пазов, обеспечивающие качество обработанных поверхностей при увеличении производительности способа.

3.1. Физическое моделирование процесса протягивания. Мировая практика обработки дисков ГТД свидетельствует о том, что повышение скорости протягивания жаропрочных материалов не только улучшает производительность процесса, но улучшает основные параметры качества поверхностного слоя [6, 7]. Опираясь на мировой опыт предложен метод исследования основных параметров качества поверхностного слоя: шероховатости, микротвердости (степени и глубины упрочнения), остаточных напряжений в зависимости от технологических факторов процесса обработки в условиях повышенных скоростей резания [8]. Данный метод базируется на создании физической модели процесса протягивания. Физическое моделирование отличается, прежде всего, тем, что исследования проводятся на оборудовании, которое имеет физическое подобие, т. е. сохраняет полностью или частично природу процесса, который

исследуется. Физическое подобие является обобщением геометрического подобия, при котором наблюдается пропорциональность подобных систем во времени и пространстве. Если говорить о физическом подобии механических процессов, то оно предусматривает обеспечение геометрического, кинематического и динамического подобия (табл. 1).

Таблица 1

Физическое моделирование процесса протягивания

Параметры сравнения	Протягивание	Физическая модель
Оборудование Кинематика и геометрия Главное движение (D_1) — поступательное прямолинейное Положение режущего лезвия относительно направления главного движения резания — прямоугольное	Станок горизонтально-протяжной 7Б57 	Станок поперечно-строгальный 7А33 
Условия стружкообразования: Процесс свободного резания; деформированное состояние срезаемого слоя является плоским		
Режущий инструмент: а) материал; б) геометрические параметры; в) качество передней и задней поверхностей	P18 передний угол $\gamma = 20^\circ$ и 27° ; задний угол $\alpha = 3^\circ$; угол заострения $\rho = 0,1$ мм; $Ra = 0,32$ мкм	P18 передний угол $\gamma = 20^\circ$ и 27° ; задний угол $\alpha = 3^\circ$; угол заострения $\rho = 0,1$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
Условия обработки образцов: а) скорость резания; б) подача	$V_1 = 2,3$ м/мин; $V_2 = 3,0$ м/мин; $V_3 = 4,5$ м/мин; $Sz_1 = a = 0,05$ мм; $Sz_2 = a = 0,1$ мм	$V_1 = 2,3$ м/мин; $V_2 = 3,0$ м/мин; $V_3 = 4,5$ м/мин; $Sz_1 = a = 0,05$ мм; $Sz_2 = a = 0,1$ мм
Внешний вид поверхностей смежных образцов, обработанных в одинаковых условиях: $V = 3$ м/мин; $Sz = 0,05$ мм/зуб; $\gamma = 20^\circ$; $Ra_{сер} = 1,42$ и $1,69$ мкм		

Для изучения влияния повышенных скоростей резания был разработан и изготовлен резец специальной конструкции (патент Украины на полезную модель № 65776), который использовался в исследованиях как модель элемента протяжки (рис. 2).

Целесообразность использования резца специальной конструкции в исследовании основных параметров качества поверхности подтверждается экспериментальными данными [9].

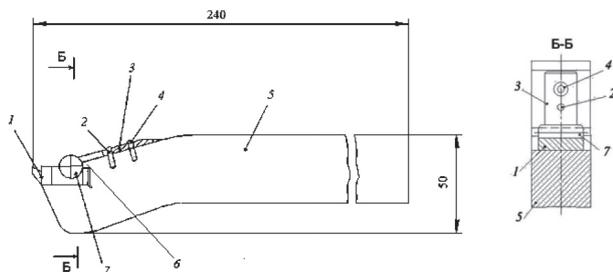


Рис. 2. Специальный резец: 1 — режущий элемент; 2 — штифт; 3 — фиксирующая пластина; 4 — винт; 5 — державка; 6 — опора; 7 — цилиндрический валик

3.2. Метод исследования основных параметров качества. Влияние технологических факторов на основные параметры качества поверхностного слоя образцов из стали ЭП517-Ш исследованы в диапазоне низких (1...6,6 м/мин), средних (6,6...14,5 м/мин) и повышенных (14,5...28,1 м/мин) скоростей резания. Измерение шероховатости обработанной поверхности образцов осуществлялось в пределах зоны характерной шероховатости, установленной на экспериментальных образцах при 20-кратном увеличении. Упрочнение поверхностного слоя исследовано по трем параметрам: микротвердость обработанной поверхности $H\mu$, МПа; степень упрочнения N , %; характер и глубина распространения упрочненного слоя h , мм. Измерение остаточных напряжений в поверхностном слое проводилось методом травления предварительно вырезанных образцов с помощью автоматической системы «ПИОН-2».

3.3. Математическая обработка и анализ результатов исследований. По результатам экспериментальных исследований построена эмпирическая модель зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости резания, подачи, переднего угла инструмента и твердости обрабатываемого материала, установлено влияние этих факторов на упрочнение поверхностного слоя и остаточные напряжения в нем [10].

Для построения модели $Ra = f(V, S, \gamma, HRC)$ был выбран один из алгоритмов метода группового учета аргументов (МГУА), реализованного совместно с представителями кафедры интегрированных технологий машиностроения НТУУ «КПИ» (г. Киев) [11]. Задача построения модели заключалась в определении функции

$$M \left(\ln y \left| \bar{x}, 1/\bar{x}, \sqrt{\bar{x}}, 1/\sqrt{\bar{x}}, \ln \bar{x}, 1/\ln \bar{x} \right| \right) = F \left(\bar{x}, 1/\bar{x}, \sqrt{\bar{x}}, 1/\sqrt{\bar{x}}, \ln \bar{x}, 1/\ln \bar{x}, \bar{v} \right), \quad (1)$$

где $M \left(\ln y \left| \bar{x}, 1/\bar{x}, \sqrt{\bar{x}}, 1/\sqrt{\bar{x}}, \ln \bar{x}, 1/\ln \bar{x} \right| \right)$ — математическое ожидание величины $\ln y$; $F \left(\bar{x}, 1/\bar{x}, \sqrt{\bar{x}}, 1/\sqrt{\bar{x}}, \ln \bar{x}, 1/\ln \bar{x} \right)$ — оператор неизвестного вида и структуры (функциональная связь); $\bar{v} = \|v_0, v_1, \dots, v_m\|$ — неизвестный вектор оцениваемых параметров. Поиск вида модели осуществлялся в классе степенных полиномов.

В результате обработки данных на ПЭВМ получена модель, которая имеет вид:

$$Ra = 6,3 - \frac{\sqrt{V}}{HRC^2} \cdot (68,2 \cdot HRC - 40,9 \cdot V) + HRC^2 \cdot \left(\frac{0,0001}{\sqrt{S}} - \frac{0,003}{\sqrt{V}} \right) + 15,6 \cdot \frac{S}{\sqrt{V}}. \quad (2)$$

Анализ структуры модели указывает на то, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности Ra имеют твердость обрабатываемого материала, скорость резания и подача. Проверка адекватности модели позволяет использовать ее в исследованиях влияния V, S, γ, HRC на формирование шероховатости обработанной поверхности образцов из стали ЭП517-Ш. Для облегчения анализа модели построены графики зависимости функции отклика Ra от каждого из аргументов (рис. 3).

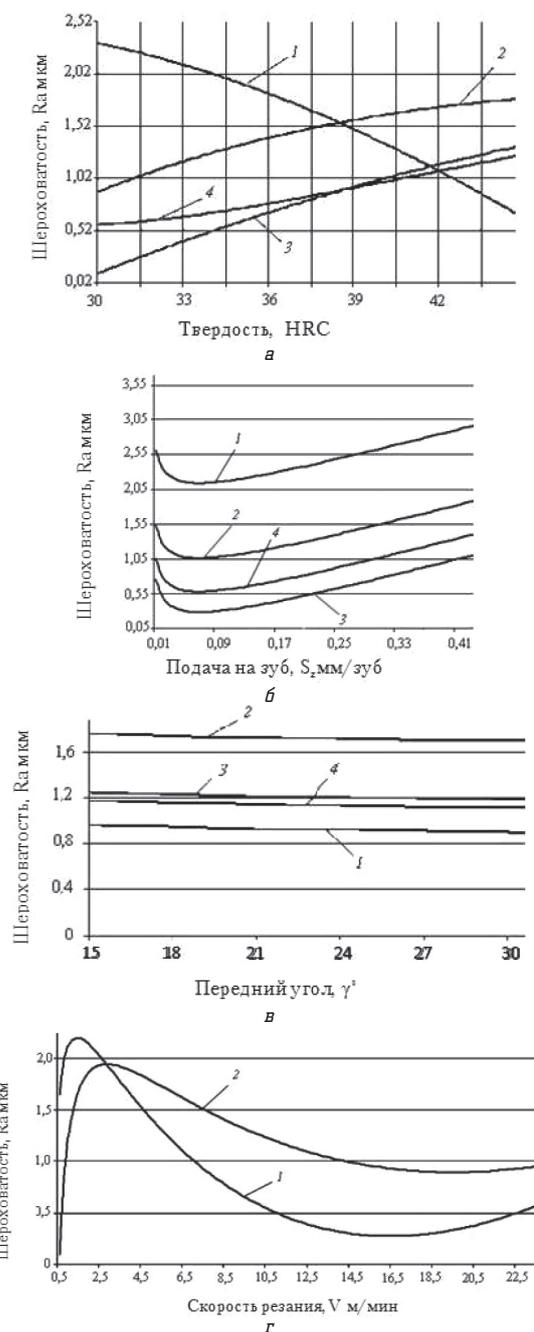


Рис. 3. Зависимость шероховатости от технологических параметров: а — $Ra = f(HRC)$, $Sz = 0,05$ мм/зуб, $\gamma = 27^\circ$ при скорости резания V : 1 — 1 м/мин, 2 — 6,6 м/мин, 3 — 14,5 м/мин, 4 — 23,7 м/мин; б — $Ra = f(Sz)$; $HRC = 33$, $\gamma = 27^\circ$ при скорости резания V : 1 — 1 м/мин, 2 — 6,6 м/мин, 3 — 14,5 м/мин, 4 — 23,7 м/мин; в — $Ra = f(V)$, $HRC = 43$ при скорости резания V : 1 — 1 м/мин, 2 — 6,6 м/мин, 3 — 14,5 м/мин, 4 — 23,7 м/мин; г — $Ra = f(V)$, $Sz = 0,05$ мм/зуб, $\gamma = 27^\circ$ при твердости HRC : 1 — 33, 2 — 43

На малых скоростях резания с увеличением твердости обрабатываемого материала шероховатость поверхности уменьшается. При повышенных скоростях резания наблюдается обратная зависимость (рис. 3, а).

Как видно из рис. 3, б, диапазон подач 0,05...0,10 мм/зуб является рациональным на каждом из уровней скоростей резания. Влияние изменения переднего угла γ на величину и характер распространения шероховатости обработанной поверхности стали ЭП517-Ш незначительный (рис. 3, в). Наилучшую шероховатость образцов ($Ra = 0,33$ и $0,36$ мкм) с твердостью $HRC 32...34$ удалось получить в интервале скоростей резания 11,4...18,1 м/мин (рис. 3, з). Наихудшая $Ra = 4,84$ мкм — при обработке материала с твердостью $HRC 40...43$ на скорости 8,7 м/мин. Для удобства анализа результатов исследования остаточных напряжений и упрочнения поверхностного слоя были построены графики (рис. 4, 5).

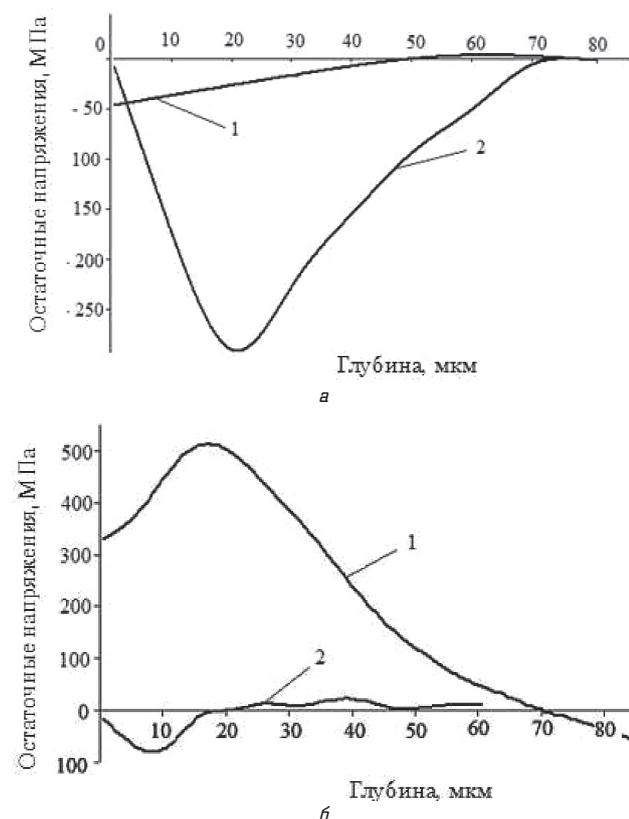


Рис. 4. Типичные графики распределения остаточных напряжений в образцах, обработанных (а): 1 — $V = 1,5$ м/мин, $HRC = 39$, $Sz = 0,07$ мм/зуб, $\gamma = 27^\circ$, 2 — $V = 1$ м/мин, $HRC = 39$, $Sz = 0,03$ мм/зуб, $\gamma = 27^\circ$; (б): 1 — $V = 28,1$ м/мин, $HRC = 32$, $Sz = 0,1$ мм/зуб, $\gamma = 20^\circ$, 2 — $V = 18,1$ м/мин, $HRC = 32$, $Sz = 0,05$ мм/зуб, $\gamma = 20^\circ$

При обработке образцов в диапазоне производственных скоростей резания 1,0...1,5 м/мин наблюдается образование сжимающих остаточных напряжений (рис. 4, а), причем в большинстве образцов они достигают максимального значения или сразу на поверхности, или на глубине 10...20 мкм. В образцах, обработанных на повышенных скоростях резания, сжимающие остаточные напряжения формируются при скорости резания $V = 18,1$ м/мин (рис. 4, б).

На поверхности образцов, обработанных на низких скоростях резания, стабильно образуется упрочненный

слой. Несколько иная картина наблюдалась при исследовании образцов, обработанных на повышенных скоростях резания (рис. 5): твердость на поверхности образцов меньше твердости основного материала. То есть в процессе обработки поверхностный слой разупрочняется под действием температурного поля, градиент которого может быть достаточно высоким.

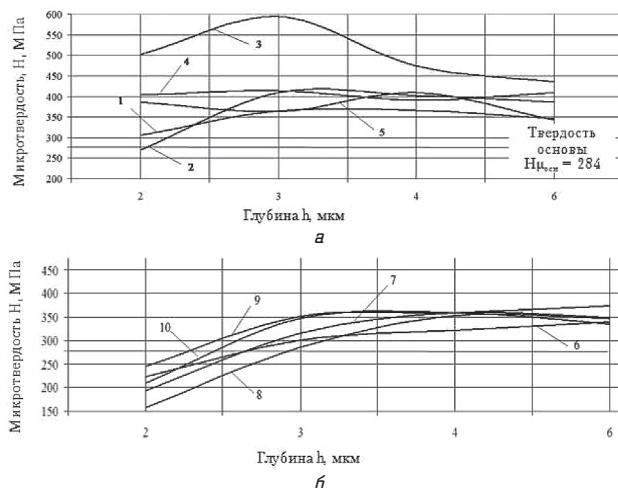


Рис. 5. Графики распределения микротвердости в поверхностном слое при обработке образцов с твердостью $HRC 32$, $\gamma = 20^\circ$, $S = 0,05$ мм на разных скоростях резания (а): 1 — $V = 4,5$ м/мин, 2 — $V = 5,9$ м/мин, 3 — $V = 6,6$ м/мин, 4 — $V = 8,7$ м/мин, 5 — $V = 11,4$ м/мин; (б): 6 — $V = 14,5$ м/мин, 7 — $V = 18,1$ м/мин, 8 — $V = 21,4$ м/мин, 9 — $V = 23,7$ м/мин, 10 — $V = 28,1$ м/мин

4. Апробация результатов исследования

Новая технология обработки замковых пазов дисков ГТД предусматривает использование быстрорежущих материалов с повышенной ударной вязкостью ($40...65$ Н/см²) и нового протяжного оборудования, которое обеспечивает значительную экономию средств и рост производительности труда за счет сокращения машинного времени (продолжительность обработки цапфы-диска по традиционной технологии составляет 28 ч, по новой — требующей работу на повышенных скоростях резания (18...20 м/мин) — 4 ч.); упрощает термические и контрольные операции; позволяет обрабатывать пазы значительной длины, например такие, как цапфа-диск нулевой ступени, при условии соблюдения необходимых параметров качества и полном отсутствии различных нежелательных дефектов на обработанной поверхности паза. Указанные выше положения подтверждены производственными испытаниями.

5. Выводы

Приведенные в данной статье результаты исследования позволяют сделать выводы:

1. Создана физическая модель элемента протяжки и обоснована целесообразность ее использования в экспериментальных исследованиях влияния повышенных скоростей резания на формирование качества обрабатываемой поверхности.

2. Используя метод МГУА, описаны зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости резания, подачи, переднего угла и твердости

обрабатываемого материала в диапазоне скоростей резания от 1...28,1 м/мин.

3. Исследованы характер распространения остаточных напряжений и упрочнения поверхностного слоя в зависимости от режимов резания, твердости материала, геометрии протяжки.

Литература

1. Богуслаев, В. А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография [Текст] / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк, В. И. Колесников и др. — Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. — 396 с.
2. Чернышев, В. В. Протягивание и упрочнение хвостовиков газотурбинных двигателей [Текст] / В. В. Чернышев, М. С. Рахмарова, Г. Б. Дейч. — М.: Машиностроение, 1971. — 276 с.
3. Романов, В. В. Применение новых материалов при конвертации корабельных и авиационных ГТД в стационарные ГТУ [Текст] / В. В. Романов, В. А. Коваль // Современные технологии в газотурбостроении. — 2010. — С. 4–7.
4. Суслов, А. Г. Обеспечение качества обработанных поверхностей с использованием самообучающейся технологической системы [Текст] / А. Г. Суслов, Д. И. Петрешин // СТИН. — 2006. — № 1. — С. 21–24.
5. Баранчиков, В. И. Обработка специальных материалов в машиностроении [Текст]: справ. / В. И. Баранчиков, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. — М.: Машиностроение, 2002. — 264 с.
6. Alberti, M. A system for optimizing cutting parameters when planning milling operations in high-speed machining [Text] / M. Alberti, J. Ciurana, M. Casadesu // J. Mater. Process. Technol. — 2005. — № 1(168). — P. 25–35.
7. Ozel, T. Modeling of high speed machining process for predicting tool forces, stress and temperatures using FEM simulation [Text] / T. Ozel, T. Altan // Processing of the CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. — Atlanta, Georgia, USA. — 1998. — P. 225–234.
8. Двирная, О. З. Исследование параметров качества поверхности при протягивании жаропрочной стали ЭП517-Ш [Текст] / О. З. Двирная, А. П. Шумилов // Наукові нотатки: міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка». — Вип. № 24. — Луцьк: ЛНТУ, 2009. — С. 162–170.
9. Двирная, О. З. Методика дослідження впливу швидкісного протягування на шорсткість обробленої поверхні [Електронний

ресурс] / О. З. Двирная, О. П. Шумилов // Вісник НУК. — Миколаїв: НУК, 2011. — № 2. — Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua/ua/publication?publicationId=8382>

10. Двирная, О. З. Вплив технологічних умов протягування замкових пазів в дисках із сталі ЭП517-Ш на шорсткість обробленої поверхні [Текст] / О. З. Двирная, П. В. Скрипник // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2011. — № 2(437). — С. 55–60.
11. Ивахненко, А. Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике [Текст] / А. Г. Ивахненко. — К.: Техника, 1971. — 372 с.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ГАЗОТУРБІНИХ ДИСКІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ОБРОБКИ

Представленні результати дослідження основних параметрів якості обробленої поверхні замкових пазів в дисках турбін і компресорів зі сталі ЭП517-Ш. Розроблена фізична модель протягування замкових пазів. В результаті експериментальних досліджень встановлені характер розподілення залишкових напружень, глибина і ступінь зміцнення поверхневого шару, запропонована модель залежності шорсткості обробленої поверхні від технологічних факторів протягування.

Ключові слова: технологічні фактори, параметри якості, замкові пази, фізична модель, високопродуктивна технологія.

Двирная Ольга Зениковна, асистент, кафедра системотехніки морської інфраструктури і енергетичного менеджменту, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна, e-mail: dvirnaolga@rambler.ru.

Шумилов Александр Павлович, кандидат технічних наук, професор, кафедра технології судового машинобудування, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна.

Двирная Ольга Зениковна, асистент, кафедра системотехніки морської інфраструктури і енергетичного менеджменту, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна.
Шумилов Александр Павлович, кандидат технічних наук, професор, кафедра технології судового машинобудування, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна.

Dvirnaia Olga, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, e-mail: dvirnaolga@rambler.ru.
Shumilov Aleksandr, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine

УДК 621.8

**Тимофеева Л. А.,
Тимофеев С. С.,
Дёмин А. Ю.,
Ягодинский Е. С.**

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

В работе был исследован один из методов поверхностного упрочнения железоуглеродистых сплавов, а именно химико-термическая обработка с использованием в качестве насыщающей среды перегретого пара водного раствора солей, состоящего из серы, молибдена, кислорода, фосфора. Применение данной технологии дает возможность повысить эксплуатационные свойства деталей и узлов машин и механизмов, работающих в условиях трения.

Ключевые слова: железоуглеродистые сплавы, упрочнение, химико-термическая обработка, парогазовая насыщающая среда.

1. Введение

Повышение долговечности и надежности деталей машин и механизмов, работающих в условиях трения и изнашивания, обеспечивается:

- подбором пары трения с минимальным коэффициентом трения;
- увеличением твердости одной или обеих сопряженных деталей;
- созданием на поверхности специальных защитных слоев с требуемыми структурой и свойствами;