

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 12 (78)

2017

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

- Макаров С.С., Чекмышев К.Э. Экспериментальное исследование охлаждения высокотемпературной металлической заготовки из стали 40X 3
- Поветкин В.В., Букаева А.З., Хандожко А.В. Использование бензовоздушных горелок для добычи и обработки блочного камня. 8

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

- Полетаев В.А., Цветков Е.В. Качество поверхностного слоя лопаток компрессоров из титана при многокоординатном глубинном шлифовании 15

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И МОДУЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ситников А.А., Собачкин А.В., Яковлев В.И., Логинова М.В., Свиридов А.П. Особенности структурного состояния механокомпозитов на основе алюминия для газодетонационного напыления покрытий. 20
- Шоев А.Н. Эффективные технологии повышения долговечности коленчатых и распределительных валов автотракторных двигателей 26

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

- Сарсенгалиев А.М., Бекренёв Н.В. Научно-техническая технология с использованием ультразвука при очистке труднодоступных поверхностей деталей сложной формы .. 29

ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

- Малов И.Е. Исследование применимости технологии лазерного управляемого термораскалывания для изготовления элементов термооптического покрытия радиаторов космических аппаратов 36

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Поляков Б.Н. Опыт внедрения САПР прокатного оборудования на Уралмашзаводе...40
- Указатель статей за 2017 г. 46

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по направлению 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Научно-технические технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г. (г. Москва)

Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М. (г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. АМОСОВ А.П. (г. Самара)

д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)

д.т.н., проф. БОЛДЫРЕВ А.И. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. БОЧКАРЁВ П.Ю. (г. Саратов)

акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)

д.т.н., проф. ЗУБАРЕВ Ю.М. (г. Санкт-Петербург)

д.т.н., проф. КИРИЧЕК А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев, Украина)

акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк, Украина)

д.т.н., проф. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)

д.т.н., проф. МОТРЕНКО П.Д. (г. Ростов-на-Дону)

д.т.н., проф. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)

д.т.н., проф. СИТНИКОВ А.А. (г. Барнаул)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.п.н., проф. СХИРТЛАДЗЕ А.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)

д.т.н., проф. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ХУДОБИН Л.В. (г. Ульяновск)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

Зам. главного редактора

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении индекс по каталогу «Роспечать» 79195.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 12 (78)

2017

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s. SUSLOV A.G. (Moscow)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.p.-m.s., prof. AMOSOV A.P. (Samara)

d.en.s., prof. ARTEMOV I.I. (Penza)

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BELOV V.D. (Moscow)

d.en.s., prof. BOLDYREV A.I. (Voronezh)

d.en.s., prof. BOCHKAREV P.Yu. (Saratov)

Acad. NAS of Belarus

VITYAZ' P.A. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)

d.en.s., prof. ZUBAREV Yu.M. (St. Petersburg)

d.en.s., prof. KIRICHEK A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. KLIMENKO S.A. (Kiev, Ukraine)

Acad. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm')

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIHAJLOV A.N. (Doneck, Ukraine)

d.en.s., prof. MOROZOV V.V. (Vladimir)

d.en.s., prof. MOTRENKO P.D. (Rostov-on-Don)

d.en.s., prof. OLEJNIK A.V. (Moscow)

d.en.s., prof. POLETAEV V.A. (Rybinsk)

d.en.s., prof. SITNIKOV A.A. (Barnaul)

d.en.s., prof. SMOLENCEV V.P. (Voronezh)

d.p.s., prof. SHIRTLADZE A.G. (Moscow)

d.en.s., prof. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

d.en.s., prof. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. HEJFETS M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. HUDOBIN L.V. (Ul'yanovsk)

d.en.s., prof. CHIGIRINSKY Yu.L. (Volgograd)

d.en.s., prof. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» 79195).
Editorial office Ph: 8-903-592-87-39
E-mail: naukadm@yandex.ru
www.ntmash.tu-bryansk.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).

Registration certificate
ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN BLANK PRODUCTION

- Makarov S.S., Chekmyshev K.E.** Experimental investigation of high-temperature 40H steel blank cooling. 3
Povetkin V.V., Bukaeva A.Z., Khandozhko A.V. Air-petrol burners use for solid stone mining and processing. 8

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

- Poletaev V.A., Tsvetkov E.V.** Surface layer quality in compressor titanium blades at multiaxes deep grinding. 15

FUNCTION-ORIENTED AND MODULAR TECHNOLOGIES

- Sitnikov A.A., Sobachkin A.V., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Sviridov A.P.** Peculiarities in mechano-composite structural state based on aluminum for gas detonation sputtering. 20
Shoev A.N. Efficient technologies for life increase of crankshafts and cam shafts in motor-car and tractor engines. 26

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

- Sarsengaliyev A.M., Bekrenyov N.V.** Science intensive technology with ultrasound use at hard-to-reach surface refinement in complex parts. 29

TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND LASER PROCESSING

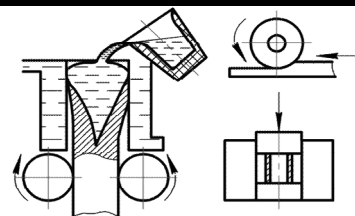
- Malov I.E** Applicability investigations of laser-controlled thermo-splitting technology for manufacturing elements of thermo-optical coating for spacecraft radiators. 36

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

- Polyakov B.N.** Experience in CAD system introduction of rolling-mill machinery at Uralsmashzavod. 40
Index of articles for the year 2017 46

A Journal is included in the list of editions approved by HEB at the Ministry of Education and Science of Russia for the publication of competitors' works for agademic degrees in the direction of 05.02.00 – Mechanical Engineering and Science of Machines.

Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»



Экспериментальное исследование охлаждения высокотемпературной металлической заготовки из стали 40Х*

Приведены результаты натурного эксперимента, полученные при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 40Х потоком недогретой воды. Приведена методика проведения эксперимента. Показаны изменения характерной температуры поверхности заготовки, охлаждаемой потоком воды по времени.

Ключевые слова: охлаждение; заготовка; поток газожидкостной среды; натурный эксперимент.

**S.S. Makarov, Can. Eng.,
K.E. Chekmyshev, M. Sc.**

(Institute of Mechanics of Urals Branch of RAS, 34, T. Baramzina Str., Izhevsk 426067)

Experimental investigation of high-temperature 40H steel blank cooling

The results of the full-scale experiment obtained at high-temperature 40H steel blank cooling with a flow of sub-cooled water are shown. To carry out experiments there is designed and assembled a device for a visual observation and fulfillment complex measurements of blank surface temperatures. For the 40H steel blank with a diameter of 24 mm, by the initial temperature of 800°C, moving in a cooling area at a speed of m/s the experimental measurements of a surface temperature at cooling with a water flow at a speed of m/s are carried out. The initial water temperature is 20°C. The measurements of a blank surface temperature were performed with the aid of a thermal imager of NEC TH9100 Pro WRI (Japan) type. There was not observed an intensive bleb steam formation in the flow of strong sub-cooled water. In the water flow at the blank border insignificant steam areas were observed which were carried away at once with a water flow. Changes of a typical temperature in a blank cooled with a water flow according to a time period are shown.

Keywords: cooling; blank; gas-liquid medium flow; full-scale experiment.

Введение

В металлургической и машиностроительной промышленности при производстве заготовок из металлов и сплавов с целью обеспечения их качества применяют различные виды термической обработки. Термическая обработка включает в себя нагрев заготовки с заданной скоростью до требуемой температуры; охлаждение в среде, обеспечивающей скорость охлаждения, при которой формируется структура материала с наилучшими технологическими и эксплуатационными свойствами.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-41-180211).

При этом технологические режимы нагрева и охлаждения определяют приближенными расчетами, либо опытным путем.

Следует отметить, что для нагрева в промышленности используют отработанные конструкции установок и нагревающих устройств с нормативными эксплуатационными условиями.

При нагреве металла используют электронагревающие устройства, обеспечивающие компактность и уменьшенные потери металла в окалину при общем малом времени нагрева.

При охлаждении используют устройства с широким спектром закалочных сред, таких, как эмульсии, масла, растворы, соли, керосин

и другие, необходимые для создания заданной скорости охлаждения.

Применение таких закалочных сред, несмотря на свою эффективность, требует соблюдения безопасности, санитарно-гигиенических условий труда, защиты окружающей среды. Поэтому, при выборе закалочных сред, предпочтение отводится воде, скорость охлаждения которой может изменяться в зависимости от температуры и режимов подачи от 5 до 20 раз [1].

Для охлаждения цилиндрических металлических заготовок широко применяются спрейерные устройства [2], позволяющие создавать одинаковые условия охлаждения по периметру заготовки за счет равномерного и симметричного подвода охлаждающей среды в виде быстро движущихся сплошных потоков жидкости.

В работе [3] приводятся результаты численного моделирования теплообмена при охлаждении металлической заготовки из стали 30ХГСН2А. Определены скорости охлаждения заготовки потоком газожидкостной среды при начальных температурах нагрева, характерных для высокотемпературных тел, на поверхности которых процесс охлаждения происходит с кипением жидкости. Анализ изменения интенсивности охлаждения в зависимости от скорости движения заготовки относительно потока охлаждающей среды показал, что движение заготовки оказывает незначительное влияние на скорость охлаждения по объему.

В работе [4] рассмотрена математическая модель сопряженной задачи конвективного теплообмена при охлаждении нагретого металлического цилиндра ламинарным потоком охлаждающей среды. Охлаждение происходит без кипения жидкости. В работе [5] предложена математическая модель сопряженного теплообмена в гетерогенной системе «твердое тело – газожидкостная среда» с учетом парообразования в охлаждающем продольном потоке жидкости у поверхности высокотемпературного металлического цилиндра. Численный алгоритм применен для исследования охлаждения металлической заготовки цилиндрической формы из конструкционной стали 30ХГСН2А [6].

В работе [7] получены результаты численного исследования параметров теплообмена при охлаждении газожидкостным потоком высокотемпературного металлического цилиндра с учетом парообразования. Определены значения температур цилиндра вдоль по-

верхности и по радиусу при охлаждении потоком охлаждающей среды со скоростью, характерной для ламинарного режима течения жидкости. Анализируется интенсивность изменения температуры поверхности металлического цилиндра в зависимости от начальной температуры, скорости потока жидкости и времени процесса охлаждения.

Целью настоящей работы является установление правомочности принятых предположений в работах [3 – 7] о незначительном влиянии паровой фазы в виде пузырьков пара в потоке сильно недогретой до насыщения воды на скорость охлаждения металлической заготовки и получение экспериментальных значений характерных температур по времени процесса охлаждения.

Результаты натурного эксперимента

Для проведения натурных экспериментов спроектировано и собрано устройство, с помощью которого производилось визуальное наблюдение и комплексные замеры – лоток. На рис. 1 приведена фотография спроектированного и изготовленного для проведения эксперимента лотка.



Рис. 1. Лоток для проведения эксперимента

Лоток выполнен в виде ёмкости прямоугольной формы из нержавеющей стали со сквозными отверстиями для прохождения заготовки и смотровыми окнами, расположенными с двух боковых сторон. Крепление лотка осуществляется болтовыми соединениями к двум направляющим, которые монтируются на механический комплекс ВТМО ВО [8].

На рис. 2 приведена схема лотка с позициями (I) и (II), между которыми производится замер температуры охлаждаемой заготовки.

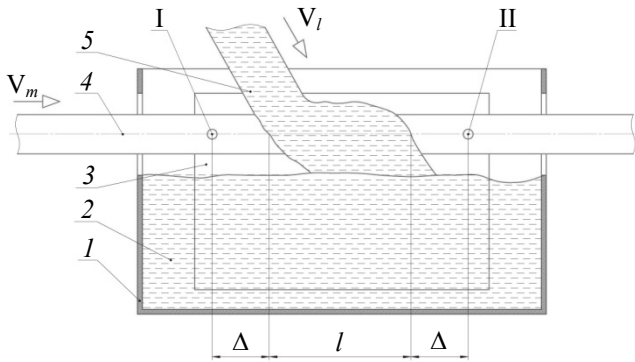


Рис. 2. Схема области проведения эксперимента:
 1 – лоток; 2 – охлаждающая среда (вода); 3 – смотровое окно; 4 – заготовка; 5 – поток воды; v_m – скорость подачи заготовки; v_l – скорость подачи охлаждающей среды

Замеры температуры поверхности охлаждаемой заготовки производились при помощи тепловизора NEC TN9100 Pro WRI (Япония). Погрешность прибора в температурном диапазоне от 0 до 2000 °С при использовании стандартного объектива составляет $\pm 2\%$.

Так как замеры температуры заготовки производили тепловизором через слой воды, то получаемые значения будем считать как характерную температуру, определяемую интегрально в интервале от поверхности заготовки до внешней поверхности потока воды.

На рис. 3 приведена фотография процесса охлаждения заготовки.



Рис. 3. Фото охлаждения заготовки

Как показывают визуальные исследования, наличие паровой фазы в эксперименте наблюдалось в виде пара, который отводился в окружающую среду за счет испарения с нагретой поверхности заготовки, и уносимого потоком жидкости. Интенсивного пузырькового парообразования в потоке сильно недогретой

воды у поверхности заготовки не наблюдалось. В потоке воды у границы заготовки наблюдались незначительные паровые зоны, которые моментально уносились потоком воды.

При проведении эксперимента исследовались различные режимы охлаждения при скорости подачи воды $v_l = 0,1 \dots 1,1$ м/с и скорости движения заготовки $v_m = 0,001 \dots 0,01$ м/с. Для оценки изменения температуры охлаждаемой заготовки выбраны следующие условия: $v_l = 0,2$ м/с; $v_m = 0,008$ м/с. Температура воды 20 °С. Начальная температура нагретой в индукторе заготовки составляет 800 °С. Температура окружающей среды 12 °С. Заготовка из стали 40Х [9]. Диаметр заготовки 24 мм. Длина зоны контакта потока воды с заготовкой $l = 45$ мм. Замер температуры производился в интервале между точками I и II, $\Delta = \pm 5$ мм (см. рис. 2).

На рис. 4 приведены значения характерной температуры фиксированной экспериментальной точки на поверхности перемещающейся металлической заготовки на участке от точки (I) до точки (II) по времени охлаждения.

Из приведенных экспериментальных замеров видно, что температура поверхности заготовки в точке I, расположенной на удалении 15...30 см от индуктора (рис. 4, а) отличается от начальной в меньшую сторону на 3...5 %. Начальный профиль температуры по длине экспериментального участка неравномерен, значения температуры изменяются по длине на 10 %. После подачи охлаждающей среды (рис. 4, б) характерная температура поверхности снижается со скоростью 1500...1600 °С/с и затем, температурный профиль принимает вид (рис. 4, в), который сохраняется до конца времени охлаждения. Средняя скорость охлаждения поверхности составляет 100 °С/с. Видно (рис. 4, г), что в точке II температура поверхности несколько возрастает, это связано с подводом тепла от внутренних слоев заготовки и отсутствием на поверхности охлаждающей воды.

На рис. 5 представлена диаграмма изменения характерной температуры поверхности охлаждаемой заготовки потоком воды на участке протяженностью 55 мм (см. рис. 2), за период времени 6,8 с.

Видно, что полученные экспериментальными замерами значения характерной температуры поверхности заготовки в зоне охлаждения (указаны точками на рис. 5) снижаются за непродолжительный период времени 1,0...2,0 с и затем меняется незначительно $\pm 10\%$.

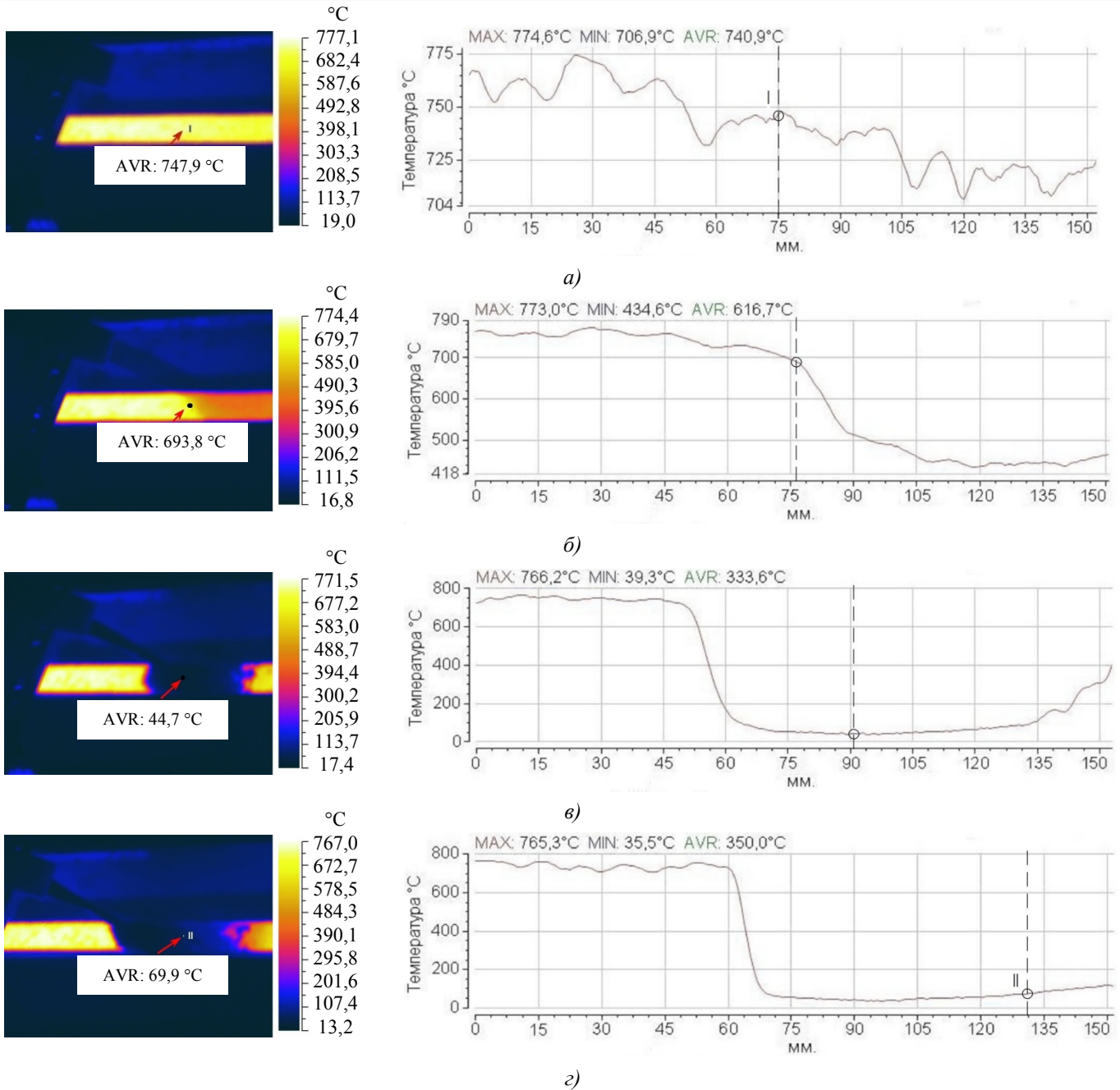


Рис. 4. Характерная температура заготовки на участке от I до II

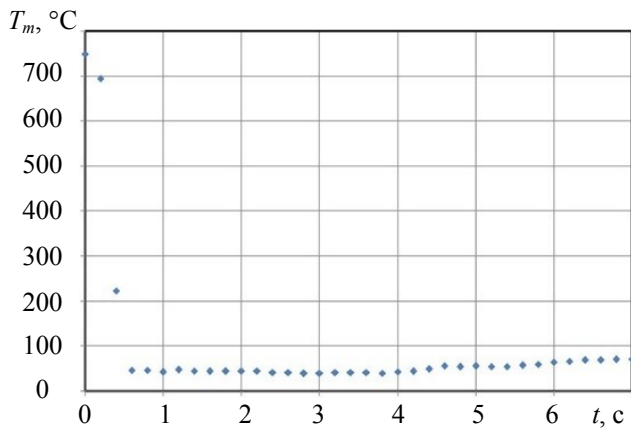


Рис. 5. Характерная температура поверхности заготовки, охлаждаемой потоком воды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты натурного эксперимента подтверждают правомочность принятых в работах [3 – 7] предположений о незначительном влиянии паровой фазы в виде пузырьков пара в потоке сильно недогретой воды на скорость охлаждения. Анализ результатов натурного эксперимента показывает, что для рассматриваемых режимов охлаждения, за временной интервал порядка 1,0...2,0 с, характерная температура поверхности металлической заготовки снижается до температуры насыщения, что хорошо согласуется с полу-

ченными результатами [3] модельных решений. Это позволяет в дальнейшем для анализа параметров теплового состояния высокотемпературных заготовок применять методы математического моделирования и разработанные численные алгоритмы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полевой, С. Н., Евдокимов, В. Д. Упрочнение машиностроительных материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1994. – 496 с.
2. А. с. № 579322 СССР. Устройства для охлаждения прокатных изделий /Черненко В.Т., Узлов И.Г., Худик В.Т., Поляков С.Н., Бухиник Е.Н., Манько В.В., Кугушин А.А., Казырский О.Л., Ереметов А.М. 1977.
3. Макаров, С.С., Дементьев, В.Б. Численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 30ХГСН2А // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 9 (75). – С. 3–8.
4. Макаров С.С., Карпов А.И., Макарова Е.В. Математическая модель конвективного теплообмена при взаимодействии потока охлаждающей жидкости,двигающегося вдоль поверхности нагретого металлического цилиндра // Химическая физика и мезоскопия. – 2016. – Т. 18. – № 1. – С. 32–40.
5. Липанов, А.М., Макаров, С.С., Карпов, А.И., Макарова, Е.В. Численное исследование охлаждения высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 53–59. doi: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 393–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.734
7. Макаров, С.С. Численное моделирование процесса охлаждения металлического цилиндра потоком газожидкостной среды,двигающимся горизонтально в кольцевом канале // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 324 – 331.
8. Четкарёв, В. А., Дементьев, В. Б., Шаврин, О. И. Анализ и оптимизация технологий упрочнения металло-

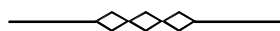
продукции методом ВТМО. – Ижевск: Институт прикладной механики УрОРАН, 1996. – 136 с.

9. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В.Г.Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Изд-во Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

REFERENCES

1. Polevoy, S.N., Yevdokimov, V.D. *Engineering Material Strengthening: Reference Book*. – М.: Mechanical Engineering, 1994. – pp. 496.
2. Author's Certificate No. 579322 the USSR. *Devices for Rolled Product Cooling* / Chernenko V.T., Uzlov I.G., Khudik V.T., Polyakov S.N., Bukhinik E.N., Manko V.V., Kugushin A.A., Kazyrsky O.L., Yeremetov A.M. 1977.
3. Makarov, S.S., Dementiev, V.B. Digital heat exchange simulation at cooling high-temperature metal blank of steel 30ChGSN2A // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.9 (75). – pp. 3-8.
4. Makarov S.S., Karpov A.I., Makarova E.V. Simulator of convective heat exchange at interaction of cooling liquid flow moving along a surface of heated metal cylinder // *Chemical Physics and Mesoscopy*. -2016. – Vol. 18. – No.1. – pp. 32-40.
5. Lipanov, A.M., Makarov, S.S., Karpov, A.I., Makarov, E.V. Numerical investigation of cooling high-temperature metal cylinder with gas-liquid medium flow // *Thermo-physics and Airflow Mechanics*. – Vol.24. – No.1. – pp. 53-59. doi: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 393–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.734
7. Makarov, S.S. Numerical simulation of metal cylinder cooling process with flow of gas liquid medium moving horizontally in ring channel // *Scientific Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. – 2017. – Vol. 17. – No.2. – pp. 324-331.
8. Chetkarev, V.A., Dementiev, V.B., Shavrin, O.I. *Analysis and Optimization of Techniques for Metal Produce Strengthening by Method of VTMO*. – Izhevsk: Institute of Applied Mechanics of Urals Branch of RAS, 1996. – pp. 136.
9. *Steel and Alloys. Grade Catalogue* / under the editorship of V.G. Sorokin, M.A. Gervasiev. – М.: Internet Engineering Publishers, 2001. – pp. 608.

Рецензент д.т.н. А.И. Коришунов



УДК 622.233.39

DOI: 10.12737/article_5a313b63b01a13.12923103

В.В. Поветкин, д.т.н.,

А.З. Букаева, магистр,

(Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22а),

А.В. Хандожко, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: chandosh@yandex.ru; vv1940_povetkin@mail.ru

Использование бензовоздушных горелок для добычи и обработки блочного камня

Описаны этапы развития термоструйных горелок с интенсификаторами горения топливных компонентов. Проведены исследования для получения явления детонации в свободной струе горелок при сжигании топливных компонентов. Приведены конструктивные особенности разработок бензовоздушных термоинструментов, позволяющие интенсифицировать процессы горения топливных компонентов.

Ключевые слова: горная порода; бензовоздушные горелки; керосино-кислородные горелки; термоинструмент; топливные компоненты (бензин, керосин, воздух), детонационное горение.

V.V. Povetkin, D. Eng.,

A.Z. Bukueva, Master,

(Satpayev Kazakh National Research Technical University 22a, Satpayev Str., Almaty, Kazakhstan 050013)

A.V. Khandozhko, D. Eng.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Air-petrol burners use for solid stone mining and processing

The development stages of thermo-jet burners with the intensifiers of fuel component combustion are described. Investigations for obtaining a detonation phenomenon in a free jet of burners at fuel component combustion are shown. The design peculiarities in developments of air-petrol thermo-tools allowing the intensification of the processes of fuel component combustion are shown.

Keywords: rock; air-petrol burners; kerosene-oxygen burners; thermo-tool, fuel components (petrol, kerosene, air); detonation combustion.

Гранит является одной из наиболее ценных и востребованных пород строительного камня, пригодного для производства станин и др. в машиностроении. В частности, значительные запасы этих пород имеются в Восточном, Центральном и Южном Казахстане.

Традиционная технология добычи гранита предусматривает проходку разрезных и врубовых траншей в массивах горных пород с использованием буровзрывных процессов. При этом широко используются бризантные взрывные вещества (аммонит). При взрывах имеют место значительные потери камня за

счет трещинообразования, приводящего к нарушению прочности и блочности основного массива.

С целью устранения недостатков, присущих буровзрывному способу проходки разрезных и врубовых траншей, на ряде месторождений гранита Казахстана, Украины применяется технология добычи блоков с использованием термической резки. Огнеструйный способ является перспективной альтернативой традиционной технологии.

При добыче гранитных блоков огнеструйный способ обеспечивает резание и обработку

горных пород при удовлетворительной производительности и с высокими скоростями. Так, производительность резания кислородно-керосиновыми горелками достигает $1,3 \text{ м}^2$ площади резания в час, а бензовоздушной – $0,8 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Разрезные и врубовые траншеи в массиве прорезаются двумя вертикальными щелями на глубину залегания пласта (до подошвы уступа). Терморезаки позволяют прорезать щели глубиной до 5 м и более, шириной $0,15...0,20$ м. Гранит из межщелевого пространства извлекается в виде блоков взрывом пороховых зарядов. Затем производится его последующая разделка на заготовки.

Внедрение технологии добычи блоков с использованием термической резки на ведущих камнеобрабатывающих предприятиях Украины и Республики Казахстан показало, что породы большинства месторождений хорошо разрушаются воздушными газоструйными термоинструментами с приемлемой для практики скоростью. Средняя производительность резания составляет $0,65 \text{ м}^2$ щели в час.

Опытно-промышленная резка пород Майкульского карьера амазонитовых гранитов (Республика Казахстан) бензовоздушными терморезаками ТРВ-5 конструкции КазПТИ обеспечила производительность резания одной горелкой $0,5 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Основным инструментом для огнеструйного разрушения можно считать конструкцию на основе авторского свидетельства №160019, выданного А.В. Бричкину и А.Н. Генбач в 1964 г., с формулой изобретения, выполненной в следующей редакции: «Прибор для термической резки и обработки пород, включающий реактивную горелку, а также топливо и газопроводы с регулирующими устройствами, отличающийся тем, что, с целью образования пульсирующего направленного потока раскаленного газа, обеспечивающего получения ровной поверхности заданной формы при обработке, например, строительного камня, реактивная горелка прибора снабжена соплом Лавалья с укороченной диффузорной частью».

В камнеобрабатывающей промышленности нашли применение два типа термоинструментов, работающих на сжигании углеводородного горючего в кислородной среде: кислородно-керосиновые и бензовоздушные.

Терморезаки, работающие на керосино-кислородной смеси имеют следующие показатели:

- производительность обработки – $1...2 \text{ м}^2/\text{ч}$, при толщине снимаемого слоя $0,05...0,06$ м или $100...150$ кг/ч отбиваемого материала;

- скорость бурения – $12...30$ м/ч при диаметре шпура $0,028...0,04$ м в зависимости от свойств породы;

- расход кислорода – $15...18 \text{ м}^3/\text{ч}$, керосина – $8...9$ л/ч, охлаждающей воды – $160...200$ л/ч;

- давление рабочих компонентов: кислорода – $0,12...0,15$ МПа, керосина – $0,12...0,15$ МПа, воды – $0,3...0,5$ МПа.

Бензовоздушные термоинструменты отличаются простотой устройства и обслуживания. Вместо сложных систем подачи горючего, окислителя и охлаждающей воды, как это имеет место при использовании керосино-кислородных горелок, используется воздушный компрессор, емкость для горючего и терморезак [5].

На рис. 1 представлена конструкция ручного терморезака ТРВ-12М, предназначенного для поверхностной обработки гранитных заготовок.

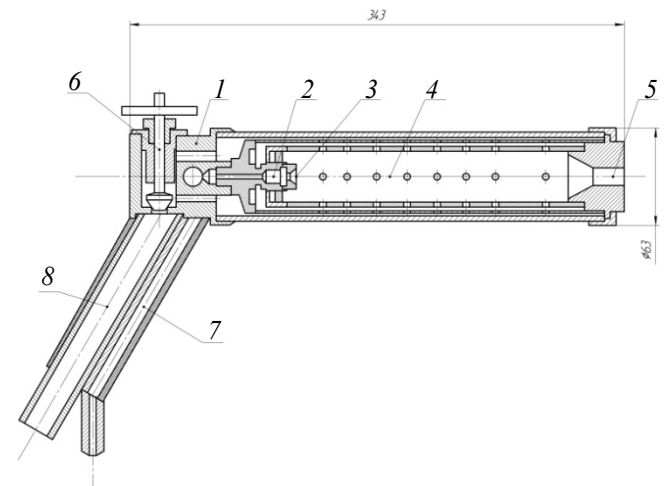


Рис. 1. Терморезак ТРВ-12М:

1 – распределительная головка; 2 – форсунка; 3 – завихритель; 4 – камера сгорания; 5 – сопло; 6 – вентиль воздушный; 7 – магистраль горючего; 8 – магистраль воздушная

На рис. 2 и 3 представлены основные схемы взаимодействия высокотемпературных и высокоскоростных струй горелок с горной породой при поверхностной обработке и резке щелевых выработок.

Рядом авторов [3, 6, 7] решена тепловая задача, в которой найдены основные параметры газового потока и производительность разрушаемой породы.

По первой схеме (рис. 2) ведётся процесс разрушения горной породы, при котором пят-

но контакта газовой струи с породой имеет круговую или эллиптическую форму.

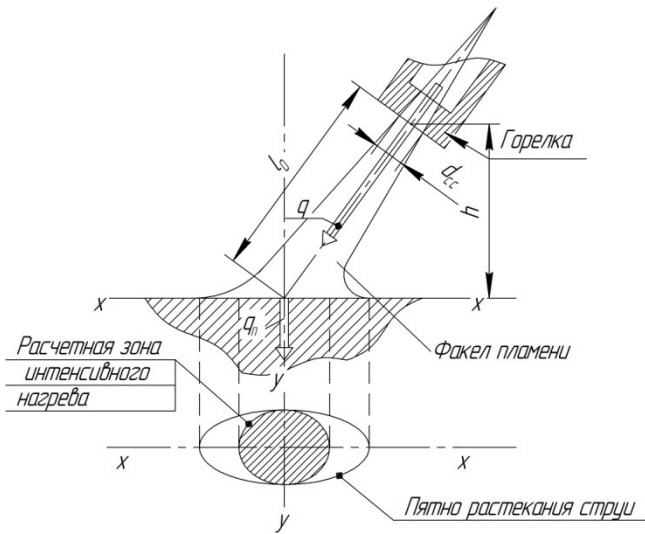


Рис. 2. Взаимодействие газовой струи с породой

По второй схеме (рис. 3) разрушение породы осуществляется при параллельном протекании газового потока, относительно горной породы, с некоторым заглублением, возможно на весь диаметр струи.

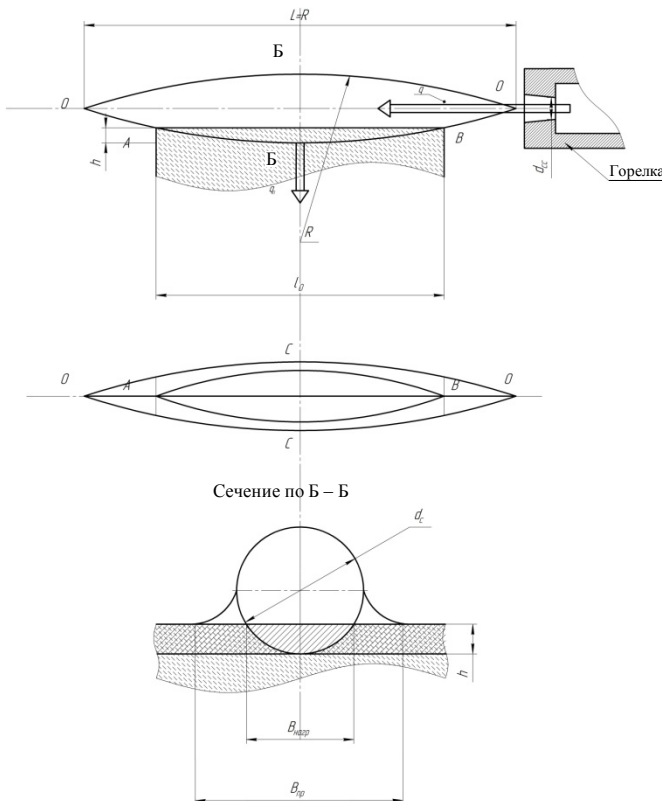


Рис. 3. Взаимодействие параллельной газовой струи с породой

Управление процессом разрушения горной породы осуществляется визуально, оператор

при этом имеет защитные устройства.

Тепловые потоки, развиваемые керосино-кислородными термоинструментами, достигают $10 \cdot 10^6$ Вт/м², что в 2 - 3 раза выше, чем у бензовоздушных, имеющих $(1,5...4,0) \cdot 10^6$ Вт/м², производительность их по сбою также выше [4]. Предлагается схема разрушения полосовым источником тепла (рис. 3), как основной схемы работы термоинструмента.

Установлено [2], что производительность огнеструйного разрушения пропорциональна мощности теплового потока, идущего в породу, тепловая мощность в свою очередь, зависит от температуры газовой струи, ее скорости и геометрических размеров пятна контакта. Указанные параметры газовой струи зависят от количества горючего и окислителя, реагирующих в камере сгорания в единицу времени. Перечисленные факторы являются режимными параметрами термоинструментов. Изучение их влияния на производительность огнеструйного разрушения необходимо для проектирования горелок целевого назначения.

Эффективность работы горелки в значительной мере зависит от организации в камере сгорания процесса смесеобразования топливных компонентов. Процесс смесеобразования зависит от подачи компонентов в камеру сгорания через форсунки и их перемешивания.

Основными показателями, характеризующими качество распыливания горючего, является тонкость и однородность, а также угол струи [4, 6]. Тонкость и однородность распыливания зависит от конструкции форсунки и перепада давления на ее срезе.

Во всех конструкциях горелок использован центробежный тип форсунок с искусственной закруткой подаваемого через неё горючего. При центробежном распыливании дальность невелика, это и определяет размеры зоны распыливания в камере, а, следовательно, и размеры камеры сгорания.

Камера сгорания является основным органом термоинструмента. Для расчета камеры сгорания необходимо определить ее объем и геометрические размеры. Объемом камеры сгорания V_k принято считать объем камеры до критического сечения. Для определения необходимого объема V_k используют один из следующих параметров:

1. Условное время пребывания продуктов сгорания в камере τ_{ycl} :

$$\tau_{\text{ycl}} = \frac{V_k}{G \cdot v_k}, \text{с}, \quad (1)$$

где V_k – объем камеры сгорания, m^3 ; G – расход топлива, $г/с$; v_k – средний удельный объем топлива и продуктов сгорания, $m^3/кг$.

2. Приведённая длина камеры сгорания

$$l_{пр} = \frac{v_k}{f_{кр}}, m, \quad (2)$$

где $f_{кр}$ – площадь сопла в критическом сечении камеры;

$$f_{кр} = \frac{G \cdot \beta}{P_z}, m^2, \quad (3)$$

где β – удельный импульс давления в камере, $м/с$; P_z – давление газов внутри камеры сгорания, $Па$.

При проектировании камеры сгорания пользуются соотношением $f_k / f_{кр} = 6 \dots 20$.

Усовершенствованным вариантом терморезака ТРВ-60, применяемого для резки щелевых выработок, является конструкция БВР-80, представленная на рис. 4. Отличительной особенностью этого инструмента является наличие специальной термодинамической насадки 2 для эжектирования атмосферного воздуха в ударные волны – «скачки» уплотнения и дожигания в них несгоревшего горючего в обогащенной струе факела горелки за пределами критического сечения сопла.

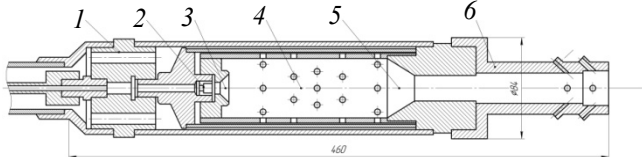


Рис. 4. Терморезак БВР80:

1 – распределительная головка; 2 – форсунка; 3 – захватитель; 4 – камера сгорания; 5 – сопло; 6 – газодинамический насадок

Скачки уплотнения образуются из-за рельефа внутренней поверхности насадка, образованного кольцевыми сверлениями отверстий, через которые всасывается эжектируемый воздух в основную струю горелки. В этой конструкции основной терморезак с камерой сгорания и соплом служит основным инструментом для создания ударного импульса в эжекционном насадке в области перфораций.

Основное требование к терморезакам для механизированной обработки, работающих на тяжелых видах топлива (соляровое масло) – это значительное повышение термодинамических параметров – температуры и скорости газовой струи при сохранении габаритных размеров.

Использование бензовоздушных горелок в качестве рабочих органов механизированных термоагрегатов сдерживается сравнительно низкой мощностью, при увеличении которой быстро возрастают их габаритные размеры, а также малыми размерами факела горелки (0,1...0,15 м) при использовании схемы обработки факелом горелки по всей его длине – «полосового источника». По этой схеме обработки газовая струя горелки направлена параллельно обрабатываемой поверхности и заглублена внутрь породы на 0,3...0,5 диаметра сопла горелки.

Однако ввиду простоты работы и организации питания топливными компонентами бензовоздушных горелок, их использование в качестве рабочих органов механизированных установок является актуальным. Повышение мощности бензовоздушных горелок без значительного развития их габаритных размеров и увеличения размеров факела горелки возможно за счет интенсификации процессов горения.

Одним из средств интенсификации горения свободных струй за пределами среза сопла является дожигание продуктов неполного сгорания обогащенной топливом смеси эжектированием атмосферного воздуха. При использовании в горелках тяжелых топливных смесей, необходимо также усовершенствование способа поджига горелок.

Следующий этап исследования интенсификации горения свободных струй был проведен с помощью горелки, разработанной с участием авторов изобретения (рис. 5) [7].

Устройство предназначено для разрушения горных пород. В нем реализуются два эффекта: разделение окислителя – воздуха на два потока: горячий воздух идет в камеру сгорания и участвует в процессе горения; другой поток холодный – идет на охлаждение камеры сгорания и через перфорацию попадает в камеру, участвуя в горении, а также через каналы в сопле – в закритическую часть сопла. Эта особенность подачи окислителя в закритическую часть сопла вызывает в потоке газа возмущения ударные волны, тем самым интенсифицируя процесс дожигания топливной смеси.

Другой конструкцией огнеструйной горелки, повышающей термодинамические параметры струи за счет подогрева горючего до газообразного состояния и подачи его в камеру сгорания, является конструкция горелки, выполненная по изобретению [8] (рис. 6).

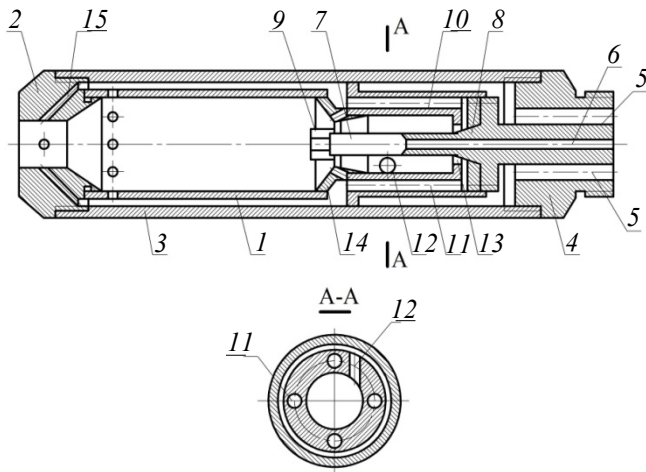


Рис. 5. Устройство для разрушения горных пород:
 1 – камера сгорания; 2 – сопло; 3 – кожух; 4 – головка распределительная; 5, 6 – каналы окислителя и горючего; 7 – полый шток; 8 – конус; 9 – форсунка; 10 – завихритель; 11 – стакан; 12, 13 – отверстие тангенциальное и центральное; 14 – переходник; 15 – каналы

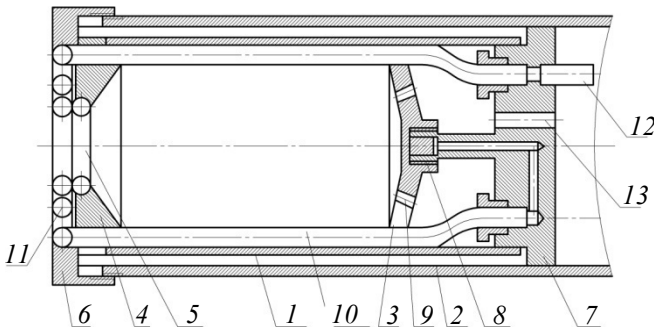


Рис. 6. Устройство для разрушения горных пород:
 1 – камера сгорания; 2 – корпус; 3 – головка распределительная; 4 – сопло; 5 – поверхность сопла; 6 – торцевая гайка; 7 – поперечная перегородка; 8 – форсунка; 9 – каналы окислителя; 10 – магистраль горючего; 11 – спиральная трубка; 12, 13 – трубопроводы подачи топлива

Эта конструкция позволила повысить тепловые и механические параметры струи горелки за счет организации горения газообразного горючего, предварительно подогретого до температуры испарения. Испытание горелки показало возможность организации такого процесса горения. Предварительные испытания горелки на газообразных топливных смесях (пропан + кислород (воздух)) указывают на целесообразность их использования при наличии необходимых источников их производства.

Важным элементом создания термоинструментов, работающих на тяжелых топливных компонентах, является их запуск в работу. Устойчивый запуск их в работу возможен только

в том случае, когда имеется комбинированная система подачи топливных компонентов в камеру сгорания. Сначала подается легко воспламеняемая смесь и ведется ее поджиг, затем перекрываются каналы легко воспламеняемого горючего (бензина) и открываются каналы тяжелого горючего.

Цель изобретения заключается в том, чтобы повысить надежность запуска горелки при меньших энергетических затратах на предварительный подогрев горючего. Это достигается в результате того, что свернутая по спирали часть магистрали горючего примыкает к наружной стороне сопловой крышки и к поверхности сопла.

Устройство автоматического переключения горючего со стартового на основной вид изображено на рис. 7 [9].

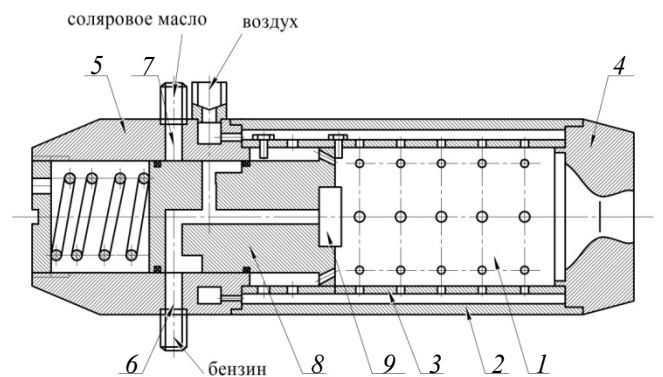


Рис. 7. Устройство для огнеструйного разрушения горных пород:

1 – камера сгорания; 2 – наружный кожух; 3 – кольцевая полость; 4 – сопло; 5 – распределительная головка; 6, 7 – каналы подачи бензина и солярового масла; 8 – подвижный поршень; 9 – форсунка

Разработанные конструкции терморезаков [7 – 11] решили ряд технологических задач – повысили производительность разрушения горных пород, автоматизировали запуск горелок в работу, что существенно важно для разработки рабочих органов механических термоагрегатов.

Проводимые исследования по интенсификации горения показывают перспективность применения явления детонационного горения для термического разрушения горных пород [10].

Качественная оценка детонационного горения была проведена на бензовоздушной горелке с интенсификатором горения в виде цилиндрической насадки на часть струи горелки с вводом воздуха через перфорацию насадка на некотором расстоянии от среза сопла [10]. В устройстве (рис. 8) детонационный эффект

достигается за счет возбуждения стационарного скачка уплотнения (ударной волны) в начале основного участка сверхзвуковой, обогащенной горючим компонентом, газовой струи горелки. Это достигается за счет трения струи рабочего тела о рельеф внутренней поверхности насадка и контакта с холодным эжектируемым воздухом и введения в него с целью интенсивного (детонационного) горения недостающего эжектируемого, обогащенного горючим струей через перфорационные каналы насадка, окислителя.

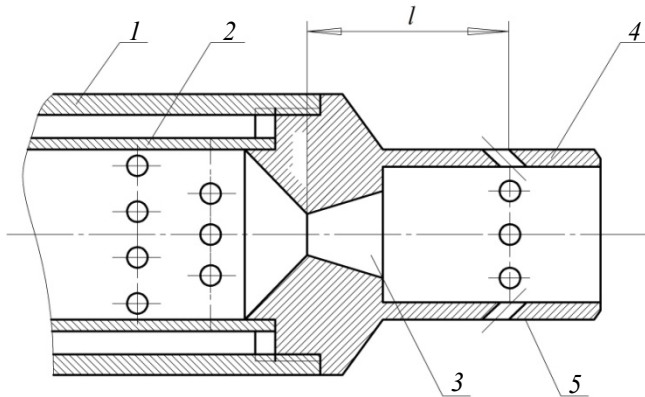


Рис. 8. Устройство для термодетонационного разрушения:

1 – горелка; 2 – камера сгорания; 3 – сопло; 4 – насадок; 5 – каналы перфорации

В сверхзвуковом потоке, вытекающем из сопла Лавалья горелки в цилиндрическую перфорированную камеру возбуждения (насадок), за счет трения о ее рельефные стенки и контакта с холодным всасываемым атмосферным воздухом образуется мощный стационарный скачок уплотнения (ударная волна). Эта волна постоянно питается эжектируемым через перфорацию окислителем из атмосферного воздуха, чем обеспечивается интенсивное (детонационное) высокопроизводительное горение.

Обогащение горючим сверхзвуковой струи производится через форсуночный аппарат горелки в пределах 15...20 % от основного расхода при работе горелки без насадка.

Газовый поток горелки подогревает избыточное горючее (до 1500...1800 °С). Горючее, реагируя с окислителем, поступающим через перфорацию насадка из атмосферного воздуха, и за счет сверхзвуковых химических реакций и мгновенного тепловыделения в скачке уплотнения, снова разгоняется в цилиндрическом насадке до сверхзвуковой скорости. При этом возникает мощный поток раскаленных газов повышенной интенсивности, скорости и массового расхода.

В результате этих испытаний установлен оптимальный угол наклона эжекционных окон насадка, который составляет 40...50 ° к его оси, а суммарная площадь окон эффективна в пределах 50...60 % от площади критического сечения сопла Лавалья горелки. При этом длина цилиндрического насадка до эжекционных окон равна 1,2...1,5 его внутреннего диаметра, который больше критического сечения сопла Лавалья в 1,5...2,0 раза.

В описываемом устройстве при взаимодействии сверхзвуковой струи с холодным эжектируемым воздухом и за счет трения струи о шероховатости внутренней стенки цилиндрического насадка 4 в месте входа окон 5 возбуждается мощный стационарный скачок уплотнения (ударная волна), в который поступает эжектируемый воздух для реагирования с горючим. Этим достигается быстрое (детонационное) горение и полное дожигание смеси.

Дожигание горючего в мощном скачке уплотнения в начале основного участка струи и вновь разгон струи в цилиндрическом насадке позволяет повысить мощность струи, ее геометрические размеры по сравнению с существующими, при этом существенно повышается производительность и эффективность разрушения горных пород.

Этот значительный эффект получается без дополнительного расхода воздуха от компрессора. При этом производительность увеличивается в 1,5 раза при увеличении расхода горючего только на 20 %. Это обеспечивает экономический эффект около 30 % по сравнению с применением горелки без насадки.

Для определения теплопередающих параметров сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй была разработана специальная горелка с возможностью использования в качестве горючего бензина, дизельного топлива и газа пропана. На рис. 9 показан фрагмент работы горелки с газодинамическим насадком при разрушении блока горной породы, при проведении щелевой выработки.

Предварительными экспериментами было выявлено, что с увеличением количества эжекционных окон, увеличиваются размеры факела и мощность ударных волн.

В настоящее время существует техническая возможность использовать термоинструменты со сверхзвуковым факелом для различных технологических операций, для разрушения горных пород при проведении щелевых выработок.

Исследования показали, что бензовоздушные горелки, с интенсификатором горения,

позволяют использовать в них детонационное горение для повышения производительности термического разрушения горных пород, автоматизировать запуск горелок в работу.



Рис. 9. Процесс работы терморезака TRV-12 M1 с насадкой

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поветкин, В.В., Нурымов, Е.К., Букаева, А.З., Серменов, А.И. Совершенствование огнеструйного способа резки горных пород при добыче блочного камня из гранитов // Поиск. – 2017. – №1(1). – С.176 – 182.
2. Поветкин, В.В. Процессы и технология огнеструйной обработки блоков крепких горных пород: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.15.11. – Алматы: КазНТУ, 2001. – 42 с.
3. Алтынов, Ж.Л. Создание комплекса манипуляционных устройств для изготовления изделий из крепких горных пород термомеханическим способом: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.05.06. – Алматы: КазНТУ, 2009. – 42 с.
4. Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Theoretical basics of flame-jet rock destruction. VestnikKazNRTU№2(120) – Almaty, 2017. – pp. 109–115.
5. Германович, Л.Н., Дыскин, А.В. Модель разрушения хрупкого материала с трещинами при одноосном нагружении // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1988. – № 2. – С. 118 – 131.
6. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Машиностроение, 2016. – 461 с.
7. А.с. №575418 СССР. Устройство для термического разрушения минеральных сред струями раскаленного газа // Аубакиров М.Г., Бобович В.С., Поветкин В.В., Сейтбатов С.М., Федоров Б.В. Оpubл. в бюл. №37, 1977.
8. А.с. №724720 СССР. Огнеструйная горелка для термического разрушения минеральных сред // Архипкин В.И.,

Поветкин В.В., Сеитов А.С., Спасенов М.И., Шапарев С.В. Оpubл. в бюл. №12, 1980.

9. А.с. №1209855 СССР. Устройство для термического разрушения твердых пород // Поветкин В.В., Сейтбатов С.М., Тлеуов М.Г. Оpubл. в бюл. №5, 1986.

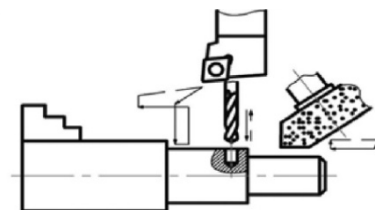
10. А.с. №1221346 СССР. Устройство для термического разрушения горных пород // Тлеуов М.Г., Поветкин В.В. Оpubл. в бюл. №12, 1986.

11. А.с. №1383875. СССР. Устройство для термического разрушения горных пород // Москалев А.Н., Поветкин В.В. и др. Оpubл. в бюл. №19, 1988.

REFERENCES

1. Povetkin, V.V., Nurymov, E.K., Bukayeva, A.Z., Sermenov, A.I. *Rock Flame-jet Cutting Method Updating at Granite Block Mining* // Search. – 2017. – No.1(1). – pp. 176-182.
2. Povetkin, V.V. *Processes and Technology of Strong Rock Flame-jet Processing*: author's abstract of D. Eng.: 05.15.11. – Almaty: KazNTU, 2001. – pp. 42.
3. Altynov, Zh.L. *Creation of Manipulation Device Complex for Manufacturing Strong Rock Products by Thermo-mechanical Method*: author's abstract of D. Eng.: 05.05.06. – Almaty: KazNTU, 2009. – pp. 42.
4. Povetkin V.V., Khandozhko A.V., Bukayeva A.Z., Nurymov Y.K. Theoretical basics of flame-jet rock destruction. VestnikKazNRTU№2(120) – Almaty, 2017. – pp. 109–115.
5. Germanovich, L.N., Dyskin, A.V. Model of brittle cracked material destruction at uniaxial load // *Proceedings of the AS of the USSR. Solid Mechanics*. – 1988. – No.2. – pp. 188-131.
6. Dobrovolsky, M.V. *Liquid-propellant Engines*. – M.: Mechanical Engineering, 2016. – pp. 461.
7. Author's Certificate No. 575418 the USSR. *Device for Mineral Media Thermal Destruction with Hot Gas Jet* // Auba-kirov M.G., Bobovich V.S., Povetkin V.V., Seitbatalov S.M., Fyodorov B.V. Published in Bull. No.37, 1977.
8. Author's Certificate No. 724720 the USSR. *Flame-jet Burner for Thermal Destruction of Mineral Media* // Arkhipkin V.I. Povetkin V.V., Seitov A.S., Spasenov M.I., Shaparev S.V. Published in Bull. No.12, 1980.
9. Author's Certificate No. 1209855 the USSR. *Device for Solid Rock Thermal Destruction* // Povetkin V.V., Seitbatalov S.M., Tleuov M.G. Published in Bull. No.5, 1986.
10. Author's Certificate No. 1221346 the USSR. *Device for Rock Thermal Destruction* // Tleuov M.G., Povetkin V.V. Published in Bull. No.12, 1986.
11. Author's Certificate No. 1383875 the USSR. *Device for Rock Thermal Destruction* // Moskalyov A.N., Povetkin V.V. et al. Published in Bull. No.19, 1988.

Рецензент д.т.н. Ж.Л. Алтынов



УДК 621.923

DOI: 10.12737/article_5a313b63e48ae6.71957852

В.А. Полетаев, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»,
Россия, Ярославская область, 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д.53),

Е.В. Цветков, к.т.н.

(ОАО «НПО «Сатурн»,
Россия, Ярославская область, 152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, д.163)
E-mail: poletaev@rsatu.ru

Качество поверхностного слоя лопаток компрессоров из титана при многокоординатном глубинном шлифовании

Изложены результаты исследования влияния технологических условий при многокоординатном глубинном шлифовании на качество поверхностного слоя лопаток компрессоров ГТД из титановых сплавов. Установлено влияние режимов шлифования на поверхность и величину остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток, а также условия возникновения дефектов в виде прижогов на обрабатываемых поверхностях лопаток.

Ключевые слова: глубинное шлифование; лопатки компрессора; остаточные напряжения; титановые сплавы.

V.A. Poletaev, D. Eng.

(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk",
53, Pushkin Str., Rybinsk, 152934, Yaroslavl region, Russia)

E.V. Tsvetkov, Can. Eng.

(PC "SPC "Saturn", 163, Lenin Avenue, Rybinsk, 152903, Yaroslavl region, Russia)

Surface layer quality in compressor titanium blades at multiaxes deep grinding

The investigation results of technological conditions impact at multiaxes deep grinding upon quality of titanium alloy blade surface layer in the compressors of gas turbine engines (GTE) are presented. The grinding mode impact upon a surface and a value of residual stresses in a surface layer of blades is defined and also conditions for defect occurrence as burns on blade surfaces under machining are detected.

Keywords: deep grinding; compressor blades; residual stresses; titanium alloys.

Глубинное шлифование лопаток ГТД является наиболее производительным способом механической обработки данных деталей. На операциях шлифования хвостовиков, бандажных полок, лабиринтов и других профильных поверхностей лопаток турбин из жаропрочных никелевых сплавов данный вид обработки является единственно возможным, так как обес-

печивает высокую геометрическую точность формы обрабатываемой поверхности, требуемую шероховатость, величину и благоприятное распределение остаточных напряжений [1, 2].

Технологические схемы обработки лопаток турбин, процессы глубинного шлифования деталей жаропрочных титановых сплавов дос-

таточно хорошо изучены, для их обработки разработано специальное технологическое оборудование, высокопористый абразивный режущий инструмент [3].

Вместе с тем большая часть лопаток ГТД изготавливается из титановых сплавов, в первую очередь это относится к лопаткам компрессоров, входных устройств ГТД, а также к узлам двигателей, работающим в условиях низких температур и агрессивной внешней воздушной среде.

Титановые сплавы по удельной прочности превосходят все иные технические материалы. Они теплоустойчивы, коррозионностойкие на воздухе и в морской воде, в кислотах и щелочах. Благодаря этому они нашли большое применение в производстве ГТД. Однако преобладающими способами их обработки до настоящего времени являются методы лезвийной обработки (точение и фрезерование). Процессы шлифования титановых лопаток применяются в ограниченных объемах, чаще всего при суперфинише деталей, полировании.

Это обусловлено характерными особенностями титановых сплавов, в том числе низкой теплопроводностью, которая у титана меньше чем у никеля в 4 раза, железа в 5 раз и алюминия в 13 - 16 раз. Низкая теплопроводность способствует большому тепловыделению в зоне обработки и является основным фактором, влияющим на обработку резанием. Низкий модуль упругости титановых сплавов обуславливает при обработке их резанием возникновение значительного упругого последствия.

Также одной из особенностей титановых сплавов является, то, что они обладают высокой химической активностью, увеличивающейся при повышении температуры, что создает предпосылки протекания химических реакций титана со средой и абразивами при шлифовании.

В результате реакций могут образовываться нитриды, карбиды и прочие твердые соединения, увеличивающие сопротивление микрорезанию титановых сплавов и силу шлифования. В результате образования продуктов реакций на поверхности трения титанового сплава с абразивом происходит увеличение микротвердости сплава в 2,0...3,3 раза, в то время как у никеля в 1,1...1,5 раза.

Увеличение микротвердости обрабатываемых материалов приводит к увеличению сопротивления микрорезанию. Физико-химические явления на границе контакта абразив-

материал способствуют прилипанию частиц металла к зернам круга, что также ухудшает показатели процесса шлифования.

Более того обработка лопаток компрессоров наиболее эффективна в условиях автоматизированного производства, т.е. в условиях многокоординатной обработки всех поверхностей наружного контура детали осуществляемых в условиях одной системы координат [3].

Однако многокоординатная обработка наружного контура лопатки существенно осложняет реализацию процесса глубинного шлифования, негативно влияет на напряжённое состояние обрабатываемой поверхности. Это обусловлено тем, что в условиях многокоординатных перемещений инструмента и детали постоянно чередуются направления рабочих подач (встречные и попутные); изменяется форма и кривизна обрабатываемой поверхности (выпуклая, вогнутая, плоская); обрабатываются полузакрытые поверхности, где шлифование ведётся одновременно цилиндрической и торцевой поверхностью шлифовального круга; постоянно изменяются условия проникновения охлаждающей жидкости в зону шлифования.

Таким образом, факторы, присущие многокоординатному шлифованию лопаток турбин, существенным образом влияют на реализацию процесса шлифования, приводят к существенному росту сил и температур резания в зоне контакта круга с деталью, что, в конечном счете, отягощает напряженное состояние поверхности обрабатываемых деталей.

При этом напряженное состояние обрабатываемой поверхности формируется в результате чрезвычайно неоднородных упругопластических деформаций под действием сил резания и изменяющегося температурного поля, существующего в условиях интенсивного теплообмена на поверхности детали. В поверхностных слоях обрабатываемых поверхностей происходят структурные изменения. Неустойчивое состояние процесса шлифования приводит к мгновенным всплескам температуры и значительным изменениям напряжённого состояния, отражающихся в локальных прижогах на поверхности детали и даже в возникновении микротрещин.

Требуются специальные исследования качества поверхностного слоя лопаток компрессоров из титановых сплавов, формируемого в условиях профильного скоростного глубинного шлифования кругами из сверхтвёрдых материалов, в частности кругами из кубического нитрида бора (CBN).

Исследования проводились на ПАО «Сатурн», в условиях серийного производства лопаток компрессоров при шлифовании образцов хвостовиков лопаток из титанового сплава TA6V, аналогично отечественному сплаву BT20.

При исследованиях использовалась одна и та же схема врезного профильного шлифования плоской поверхности замка хвостовика и цилиндрической поверхности его полки. Длина шлифования на каждом образце составляла 130 мм. Шлифование осуществлялось кругом из кубического нитрида бора следующей характеристики: J10A-20016/5-181-VR150J/C-76. Шлифование осуществлялось на многоцелевом центре мод. SXS-512 при подаче охлажда-

ющей жидкости под давлением 10 бар. В ходе шлифования варьировались следующие режимы обработки: скорость круга v_k : 30, 50, 70 м/с; скорость детали v_d : 100, 300, 600 мм/мин; глубина шлифования t : 0,1; 0,5; 1,0; 1,5 мм; направление подачи: встречная, попутная.

По результатам испытаний проводились измерения величины остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и параметра шероховатости Ra . Величина остаточных напряжений измерялась методом дифракции рентгеновских лучей с помощью дифрактометра XSTRESS 3000 σ_3 .

Условия эксперимента и его результаты приведены в табл.1.

1. Условия эксперимента и его результаты

Схема обработки	Направление подачи	Скорость круга v_k , м/с	Скорость детали v_d , мм/мин	Глубина шлифования t , мм	Шероховатость Ra , мкм	Остаточное напряжение $\sigma_{ост}$, МПа
	встречная	30	100	1,5	1,37	-380
	попутная	30			1,21	-280
	встречная	50			0,95	-390
	попутная	50			0,87	-230
	встречная	70			0,76	-320
	попутная	70			0,64	-150
	попутная	50	600	1,0	0,435	-80
	попутная	50	300	0,5	0,51	-400
	попутная	50	100	1,0	0,67	-110

На каждом из 9-ти сочетаний режимов шлифовалось по пять образцов. Средние показатели качества поверхностного слоя для каждого из сочетаний режимов занесены в табл.1.

Анализ представленных результатов показывает, что при всех сочетаниях режимов шлифования в поверхностном слое детали формируются остаточные напряжения сжатия. При этом с ростом скорости круга v_k величина напряжений и шероховатость уменьшается тем интенсивнее, чем выше скорость круга.

При сравнении направлений подачи детали неоспоримое преимущество имеет попутное шлифование, о чем свидетельствуют меньшие значения шероховатости при прочих равных условиях. С увеличением интенсивности обработки, ростом глубины и скорости показатели качества ухудшаются. Однако наиболее чувствителен процесс шлифования к изменению скорости круга v_k .

На рис. 1 представлены усредненные эпюры распределения остаточных напряжений. Здесь каждая эпюра по порядку соответствует сочетанию режимов шлифования, приведён-

ных в табл. 1.

Анализ приведенных эпюр распределения остаточных напряжений показывает, что наиболее благоприятные величины и распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя детали наблюдаются при шлифовании с попутной подачей при величине непрерывной правки порядка 1,0 мкм/об. круга. Уменьшение величины правки до величины порядка 0,2 мкм/об. круга приводит к резкому росту величины остаточных напряжений, что еще более усугубляется при использовании шлифования с встречной подачей.

Изменение направления подачи с попутной на встречную и уменьшение величины правки являются наиболее значительными факторами, влияющими на неблагоприятное распределение остаточных напряжений по сравнению с глубиной шлифования t и скоростью детали v_d . Увеличение этих параметров (v_d и t) также интенсифицирует процесс шлифования, приводит к росту остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ и увеличению глубины u их распределения в поверхностном слое, однако их влияние на

величину $\sigma_{ост}$ менее значимо, чем направление | подачи детали и величина правки круга S_p .

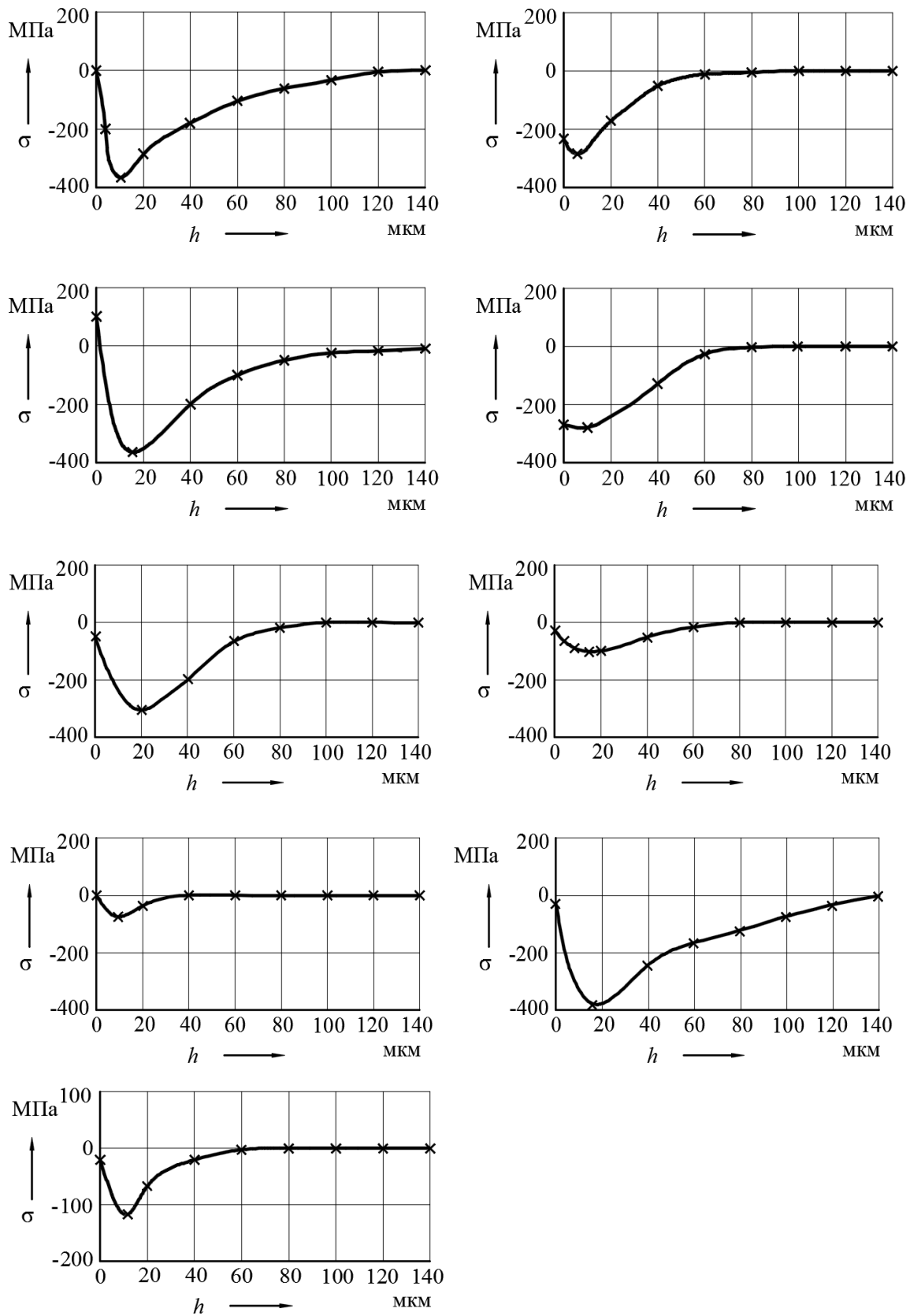


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ по глубине поверхностного слоя h в зависимости от скорости детали v_d , глубины шлифования t скорости правки S_p и направления подачи (табл. 1)

Проведенные исследования позволяют сделать однозначный вывод о преимуществах шлифования с попутной подачей при непрерывной правке круга со скоростью подачи 0,8...1,0 мкм/об. круга. При соблюдении этих двух условий процессы глубинного шлифования лопаток компрессоров из титановых сплавов наиболее устойчивы в пределах возможных вариаций режимов шлифования, соответствующих условиям бездефектного шлифования.

Анализ шероховатости поверхности лопаток, обработанных на приведенных выше сочетаниях режимов показывает, что высота микронеровностей в большей мере зависит от скорости круга v_k , чем от остальных режимов (скорости детали, глубины шлифования и направления подачи). Причем при скорости круга до 30 м/с высота микронеровностей достигает наибольших значений ($Ra > 1,37$ мкм), а характер рельефа «вытянут» в направлении вращения инструмента. При повышении скорости круга $v_k > 30$ м/с высота микронеровностей значительно меньше, так при $v_k = 70$ м/с величина Ra не превышает 0,76 мкм. (Значения параметра шероховатости Ra , полученные в ходе исследований, приведены в табл. 1).

В целом значения параметра шероховатости Ra поверхностей лопаток компрессоров из титановых сплавов, полученные при глубинном шлифовании кругами из CBN, соответствуют требованиям предъявляемым к данным деталям.

Микроструктура поверхностного слоя лопаток на всех образцах, кроме тех, что получены при скорости круга $v_k = 70$ м/с соответствует эталонам (фото) требуемого поверхностного слоя лопаток. Измененный слой отсутствует. Микроструктура поверхностей лопаток при скорости $v_k = 70$ м/с; $t = 1,5$ мм; $v_d = 100$ мм/мин, при попутном и встречном направлении подачи имеет измененную структуру, соответствующую микроструктуре перегрева поверхности. Глубина измененного слоя не превышает 20 мкм. При удалении от поверхности вглубь детали микроструктура сплава ТА6 соответствует эталонам. То есть данные сочетания режимов возможно использовать только при предварительном шлифовании деталей, в дальнейшем они требуют чистой обработки на менее «напряженных» рабочих режимах шлифования или суперфиниша (полировки).

Проведенные исследования могут использоваться для предварительного назначения режимов шлифования и окончательно утвер-

ждаться в ходе отладки технологического процесса конкретной детали, конфигурация которой оказывает влияние на осуществление процессов глубинного шлифования, а соответственно и на предельно допустимые значения температур шлифования и параметров качества поверхностного слоя.

Выводы:

1. Полученные результаты свидетельствуют о возможности достижения благоприятного распределения и величины остаточных напряжений при многокоординатном глубинном шлифовании лопаток компрессоров из титановых сплавов при определенных сочетаниях режимов обработки, а именно: скорости v_d и глубины t шлифования; скорости правки Sp ; направления подачи.

2. Рекомендуемые в статье значения режимов глубинного шлифования являются оценочными и должны окончательно утверждаться в ходе отладки технологического процесса конкретной детали, конструктивный облик которой накладывает свои особенности на осуществление процессов глубинного шлифования, а соответственно и на предельно допустимые значения температур шлифования и параметров качества поверхностного слоя.

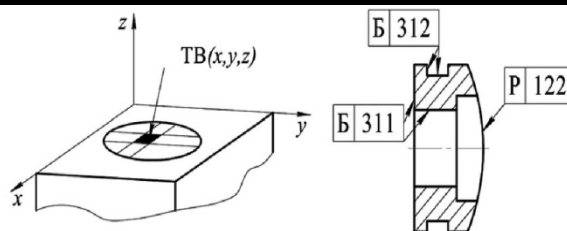
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Оптимизация** технологии глубинного шлифования // С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
2. **Полетаев, В.А.** Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение. 2006. – 256 с.
3. **Полетаев, В. А., Волков, Д.И.** Глубинное шлифование лопаток турбин: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.

REFERENCES

1. *Optimization of Deep Grinding Technology* // S.S. Silin, B.N. Leonov, V.A. Khrulkov et al. M.: Mechanical Engineering, 1989. pp. – 120.
2. *Poletaev, V.A. Technology for Automated Manufacturing Gas Turbine Engine Blades.* M.: Mechanical Engineering. 2006. – pp. 256.
3. *Poletaev, V.A., Volkov, D.I. Turbine Blade Deep Grinding: Technologist's Library.* – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 272.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров



УДК 621.793.79

DOI: 10.12737/article_5a313b64412fb3.98021038

А.А. Ситников, д.т.н., **А.В. Собачкин**, к.т.н.,
В.И. Яковлев, к.т.н., **М.В. Логинова**, к.т.н.,
А.П. Свиридов, аспирант
(ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46)
E-mail: anicpt@rambler.ru

Особенности структурного состояния механокомпозитов на основе алюминия для газодетонационного напыления покрытий*

Исследована морфология порошковой композиционной смеси, содержащей алюминий, углеродные структуры и карбид бора, после механической активации в планетарной шаровой мельнице. Установлено, что после 7 мин механической обработки средний размер порошковых частиц составляет порядка 100 мкм, что является приемлемым для газодетонационного напыления. Элементный анализ показал, что окисления компонентов в процессе механической активации не происходит.

Ключевые слова: композиционный материал; алюминий; углерод; фуллерен; газодетонационное напыление.

A.A. Sitnikov, D. Eng., **A.V. Sobachkin**, Can. Eng.,
V.I. Yakovlev, Can. Eng., **M.V. Loginova**, Can. Engl.,
A.P. Sviridov, Post graduate student

(FSBEI HE Polzunov State Technical University of Altay, 46, Lenin Avenue, Barnaul, Russia, 656038)

Peculiarities in mechano-composite structural state based on aluminum for gas detonation sputtering

Structural peculiarities of a powder composite mixture on the basis of aluminum and dispersion carbon structures intended for gas-detonation sputtering for an anti-friction purpose are investigated in the paper. As initial materials there was used an aluminum powder, carbon powder, boron carbide powder, powder slurry consisting of fullerenes C60 and ultra-dispersion diamonds in a certain ratio. The powder mixture obtained was subjected to a mechanical activation with the aid of a planetary ball mill of AGO-2S type. According to the results of the morphological analysis it was established that a composite mixture possesses a layer structure characteristic for powder mixtures subjected to a mechanical activation in the course of a long period of time. A mean size of obtained mechano-composite particles makes about 100...150 mkm.

An X-ray structural investigation of a composite powder mixture formulations 70%Al+30%C+B4C and 70%Al + 30%C60 (total %) + B4C after mechanical activation revealed that boron carbide contributes well to the amorphization of a composite powder mixture. It is also established that after mechano-activation of the "Al+C+B4C" powder mixture during 4 min carbon transforms to an X-ray amorphous state to which testifies the presence of amorphous "halo" at small angles and carbon peaks disappeared completely. There is no carbon dissolution in aluminum and chemical compounds are not formed.

Keywords: composite material; aluminum; carbon; fullerene; gas detonation sputtering.

При работе и эксплуатации машин значительная доля энергетических потерь приходится на трение, в результате чего

*Часть исследований выполнялась в рамках государственного Задания № 11.1085.2017/4.6 на НИОКР Министерства образования и науки РФ.

возрастают финансовые затраты. Разрушение узлов и агрегатов в большинстве случаев начинается с приповерхностных слоев.

Поэтому огромное значение уделяется работам по получению принципиально новых антифрикционных материалов, в том числе

покрытий с антифрикционными свойствами, которые бы обеспечивали бесперебойную работу тяжело нагруженных изделий [1, 2].

На сегодняшний момент хорошо исследованы разнообразные износостойкие покрытия, полученные с применением как керамических, так и металлокерамических композиционных материалов. Однако при работе в режиме сухого трибологического трения подобные покрытия обладают высоким коэффициентом трения, что повышает расход энергии и приводит к нежелательному нагреву в области контакта. При этом из-за высокого коэффициента трения резко увеличивается износ пары трения [2].

Снизить негативное влияние недостатков используемых в настоящее время материалов можно с помощью применения композитов на основе металлической матрицы с упрочнителями в виде высоко модульных армирующих частиц [3]. Наиболее широко распространены композиционные материалы с алюминиевой матрицей и упрочнителями в виде частиц оксидов, нитридов, карбидов, волокон бора, графита и т.п. По сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами алюмоматричные композиционные материалы обладают более высокой удельной прочностью, жесткостью, при этом показатели электро- и теплопроводности сохраняются или незначительно снижаются, что позволяет успешно использовать алюмоматричные композиты в ряде отраслей техники [4].

Известно, что при переходе к наноразмерному состоянию материалы обладают особой структурой и начинают проявлять уникальные физико-механические свойства, значительно превосходящие характеристики макро- и микро материалов. Одним из распространенных способов получения наноструктурных композиционных материалов являются методы механической активации, к достоинствам которых относится возможность тонкого регулирования свойств, структуры и фазового состава материалов за счет изменения типа и концентрации упрочняющей фазы [5].

Среди таких потенциальных упрочнителей, как наноразмерные оксиды, карбиды, нитриды, вискерсы и другие, особое положение занимают углеродные наноструктуры (УНС): фуллерены C₆₀, наноалмазы и графены, свойства которых интенсивно исследуют в последние годы. Эти объекты обладают высокими значениями тепло- и электропроводности, сверхупругостью, что может обеспечить получение композиционных наноматериалов с

уникальным комплексом физико-механических свойств [6].

Перспективной технологией, позволяющей наносить разнообразные материалы на поверхности деталей, является детонационно-газовое напыление, к преимуществам которого относится высокая прочность сцепления покрытий с изделием, низкая пористость покрытия и незначительное термическое воздействие на напыляемую металлическую основу [7].

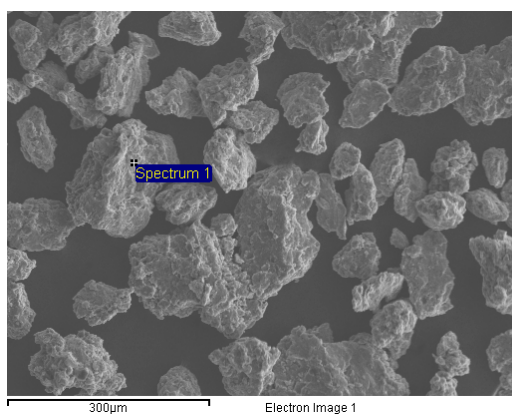
Таким образом, разработка методов получения алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных УНС, технологии нанесения покрытий из таких материалов и исследование структуры и свойств является актуальной задачей, представляющей научный и практический интерес [8].

В работе [7] авторами получен механокомпозит на основе алюминия с аморфной структурой углеродного компонента. Аморфная структура характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов, благодаря чему в ней нет кристаллической анизотропии, отсутствуют границы блоков, зерен и другие дефекты структуры, типичные для поликристаллических материалов. На термическую стабильность аморфных сплавов оказывает наибольшее влияние кремний и бор, наибольшей прочностью и износостойкостью обладают сплавы с бором и углеродом.

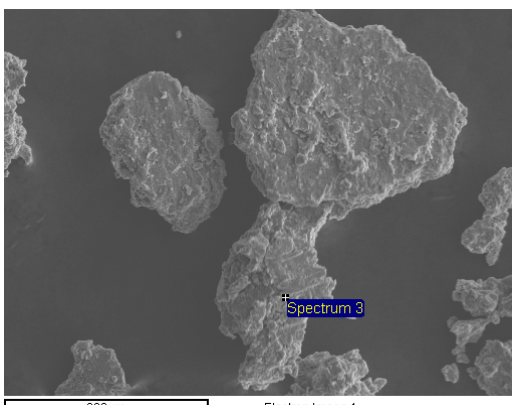
Кроме того, в настоящее время одним из перспективных способов улучшения функциональных характеристик алмазоподобных покрытий является их легирование карбидообразующими металлами за счет образования в их матрице ультрадисперсных карбидных включений. Использование в качестве карбидообразующих переходных металлов хрома, вольфрама и молибдена при легировании алмазоподобных покрытий должно способствовать высоким противозносным и антифрикционным свойствам, как это было отмечено, например, в работе [9] для алмазоподобных покрытий, допированных хромом.

Поэтому в настоящей работе в состав исходной порошковой смеси дополнительно вводилось некоторое количество карбида бора (порядка 1,0...1,5 % по объему смеси). Карбид бора вводится в смесь также для улучшения физико-механических свойств покрытий.

Целью данной работы является установление структурных особенностей порошковой композиционной смеси (на основе алюминия и дисперсных углеродных структур), предназначенной для газодетонационного напыления покрытий антифрикционного назначения.

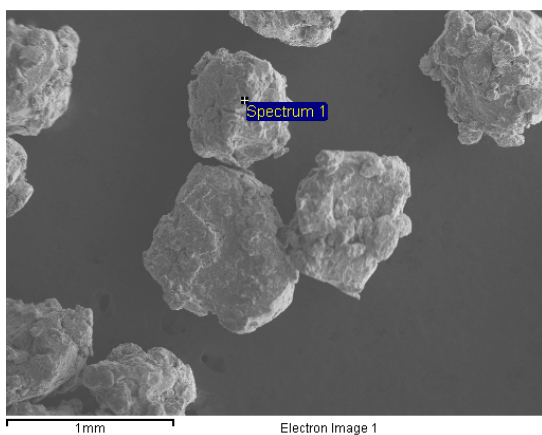


Спектр 1 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
B	6,26
C	23,85
Al	67,89

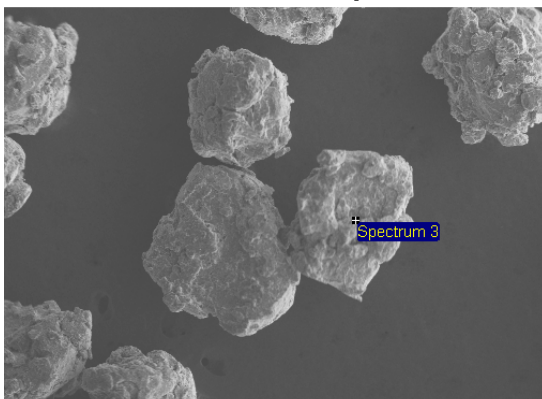


Спектр 3 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
B	0,00
C	16,34
Al	83,66

Рис. 1. Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C (об. %) + В₄С после 7 мин механоактивационной обработки



Спектр 1 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
B	6,75
C	16,34
Al	76,19



Спектр 3 (в микроточке)	
Элемент	Весовой %
B	2,40
C	32,54
Al	63,37

Рис. 2. Энергодисперсионный анализ порошковой композиционной смеси состава 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) + В₄С после 7 мин механоактивационной обработки

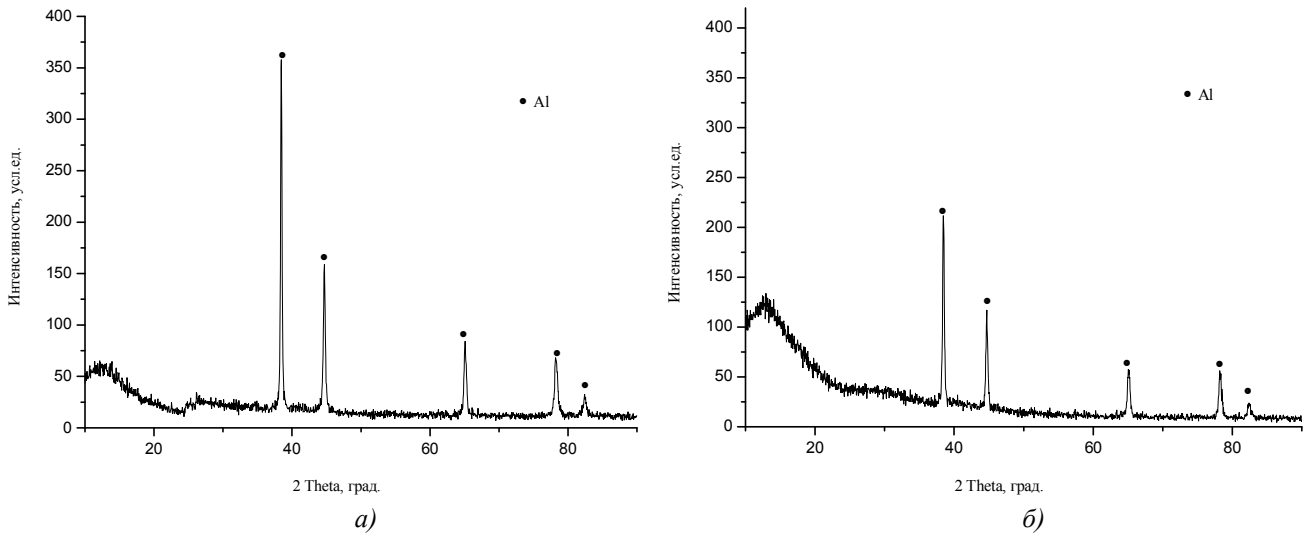


Рис. 3. Дифрактограмма порошковой композиционной смеси:

а – состав 70% Al + 30% C + B₄C после 7 мин механической активации; *б* – состав 70% Al + 30% C₆₀ + B₄C после 7 мин механической активации

Объекты и методы исследования

В качестве исходных материалов для получения порошковых композиционных смесей использовали порошок алюминия марки АД0, порошок углерода марки ПМ-15, порошок карбида бора, порошкообразную суспензию, состоящую из фуллеренов C₆₀ и ультрадисперсных алмазов в определенной пропорции. Фракционный состав всех исходных порошковых компонентов находился в пределах 40...100 мкм, фуллерен находился в наноструктурном состоянии (порядка 50 нм).

Выбранные компоненты смешивались в требуемых соотношениях. Полученная порошковая смесь подвергалась механической активации с помощью планетарной шаровой мельницы АГО-2С. Выбор данного способа воздействия на материалы обусловлен необходимостью создания композиционной порошковой смеси.

Подбор компонентов порошковой смеси обусловлен рядом факторов [10]:

- необходимостью обеспечить химическое сродство материала покрытия к материалу основы (поршня). Поскольку поршень изготавливается из силумина, то в качестве матрицы композиционной смеси логично выбрать алюминий.

- необходимостью обеспечить низкие коэффициенты трения в паре трения поршень–цилиндр. Для выполнения этого требования с учетом анализа современного состояния вопроса был выбран перспективный материал – фуллерен C₆₀.

Результаты и их обсуждение

Морфология и элементный состав композиционной смеси 70 % Al + 30 % C (об. %) с дополнительным введением в состав порядка 1,0...1,5 % карбида бора представлена на рис. 1. Видимых отличий от композиционной смеси без карбида бора не наблюдается [10]. Композиционная смесь обладает слоистой структурой, характерной для порошковых смесей, подверженных механической активации в течение продолжительного времени. Как видно на приведенном изображении, карбид бора распределен по частицам механокомпозита неравномерно.

Морфология и элементный состав композиционной порошковой смеси 70 % Al + 30 % C₆₀ (об. %) + B₄C после воздействия механической активации приведены на рис. 2.

Дифрактограммы композиционной порошковой смеси состава 70 % Al + 30 % C + B₄C и состава 70 % Al + 30 % C₆₀ (об. %) + B₄C после механической активации представлены на рис. 3, *а* и *б*, соответственно, на которых видно, что карбид бора хорошо способствует аморфизации композиционной порошковой смеси.

В табл. 1 приведено сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов алюминия состава 70 % Al + 30 % C + B₄C и состава 70 % Al + 30 % C₆₀ (об. %) + B₄C (снято на CuKα-излучении (λ = 1,5418 Å), соответствует рис. 3).

Как видно из рис. 3, после механоактивной обработки порошковой смеси

«Al+C+V₄C» в течении 7 мин углерод полностью переходит в рентгеноаморфное состояние, о чем свидетельствует наличие аморфного «галло» на малых углах и полностью исчезнувшие пики углерода. Однако растворения

углерода в алюминии не происходит (на дифрактограмме пики алюминия узкие, симметричные, без смещения, параметр решетки сохраняется, что подтверждается данными табл. 1), химических соединений также не образуется.

1. Сравнение параметров экспериментальных и эталонных дифракционных максимумов Al

(HKL)	Экспериментальные значения Al для состава 70% Al + 30% C + V ₄ C		Экспериментальные значения Al для состава 70% Al + 30% C ₆₀ (об. %) + V ₄ C		Эталонные значения Al по (4-787) Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ.539, Swanson, Tatge., I, 11, 1953 (База данных порошковой дифрактометрии PD Win 3.0)	
	2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å	2Theta, град.	d, Å
(111)	38,42	2,341	38,40	2,342	38,47	2,338
(200)	44,67	2,026	44,66	2,027	44,73	2,024
(220)	65,09	1,432	65,10	1,431	65,13	1,431
(311)	78,18	1,221	78,20	1,221	78,22	1,221
(222)	82,42	1,169	82,42	1,169	82,43	1,169

Объяснить исчезновение пиков углерода можно следующим.

Алюминий более пластичен, частицы графита чувствительнее к механическим нагрузкам. Можно предположить, что механоактивированная смесь представляет собой механокомпозит Al – C, представляющий собой слоистую структуру, состоящую из частиц алюминия, на которых распределен тонкий слой рентгеноаморфного углерода. Данная гипотеза подтверждается данными электронной микроскопии (см. рис. 1, 2).

Из анализа морфологии и дифрактограмм механокомпозитов, полученных при различном времени механической активации и различного состава, были выделены наиболее перспективные составы для дальнейшего напыления и исследования:

1) состав № 1: композиционная порошковая смесь 70 % Al + 30 % C₆₀ + V₄C после 7 мин механической активации;

2) состав № 2: композиционная порошковая смесь 70 % Al + 30 % C + V₄C после 7 мин механической активации.

Выводы:

1. Морфология смесей составов 70% Al + 30% C (об. %) + V₄C и 70% Al + 30% C₆₀ (об. %) + V₄C после 7 мин механоактивационной обработки имеет выраженную слоистую структуру, отдельных частиц исходной шихты (алюминия и углерода) в составе композици-

онной порошковой смеси после механической активации не обнаружено. Средний размер получившихся частиц механо-композита составляет порядка 100...150 мкм, что является приемлемым для детонационного напыления.

2. Анализ элементного состава композиционных порошковых смесей позволяет констатировать, что окисления алюминия в процессе механической обработки не происходит.

3. С учетом морфологии и энергодисперсионного анализа механокомпозитов, полученных при различных временах механической активации и различного состава, были выделены наиболее перспективные составы для дальнейшего напыления и исследования:

а) состав № 1: композиционная порошковая смесь 70 % Al + 30 % C₆₀ + V₄C после 7 мин механической активации;

б) состав № 2: композиционная порошковая смесь 70 % Al + 30 % C + V₄C после 7 мин механической активации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sobachkin, A.V., Sitnikov, A.A., Sviridov, A.P. Evaluation of wear resistance of products on the basis of mechanically activated materials // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Т. 698. – P. 374–377.

2. Hogmark, S., Jacobson, S., Larsson, M. Design and evaluation of tribological coatings // Wear. – 2000. – V. 246. – P. 20–33.

3. Собачкин, А.В., Яковлев, В.И., Ситников, А.А.

Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания новых наплавочных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 9. – С. 17–22.

4 Mitterer, C., Lenhart, H., Mayrhofer, P.H., Kathrein, M. Sputter-deposited Al–Au coatings // *Intermetallics*. – 2004. – Vol. 12. – P. 579–587.

5. Yakovlev, V.I., Loginova, M.V., Sobachkin, A.V., Dong, Ya., Guriev, A.M. The obtaining of mechanically alloyed nanostructured layered composites and detonation coatings // *Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys : Book of the International seminar articles*. – 2015. – P. 108.

6. Wei, Q. Narayan, J. Superhard diamond-like carbon: preparation, theory, and properties // *International Materials Reviews*. – 2000. – Vol. 45. – P. 133–164.

7. Собачкин, А.В., Яковлев, В.И., Ситников, А.А., Логинова, М.В., Иванов, С.Г., Свиридов, А.П. Газодетонационные покрытия юбки поршня двигателя внутреннего сгорания на основе алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 7 (139). – С. 34–38.

8. Собачкин, А.В., Яковлев, В.И., Ситников, А.А., Логинова, М.В., Иванов, С.Г., Свиридов, А.П. Особенности формирования покрытий из алюмоматричного углеродсодержащего композиционного материала при газодетонационном напылении // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2015. – Т. 12. – № 4. – С. 444–449.

9. Хрущов, М.М., Марченко, Е.А., Левин, И.С., Дубравина, А.А., Букалов, С.С., Тарелкин, Ю.А. Наноконструктивная структура и трибологические свойства алмазоподобных покрытий, легированных хромом // *Вестник научно-технического развития*. – 2014. – №80. – С. 24–31.

10. Собачкин, А.В., Ситников, А.А., Яковлев, В.И., Свиридов, А.П. Порошковые алюмоматричные композиции для газодетонационного напыления покрытий // *Ползуновский альманах*. – 2017. – № 3. – Т.1. – С. 115–119.

REFERENCES

1. Sobachkin, A.V., Sitnikov, A.A., Sviridov, A.P. Evaluation of wear resistance of products on the basis of mechanical

ly activated materials // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 374–377.

2. Hogmark, S., Jacobson, S., Larsson, M. Design and evaluation of tribological coatings // *Wear*. – 2000. – V. 246. – P. 20–33.

3. Sobachkin, A.V. Yakovlev, V.I., Sitnikov, A.A. Application of methods of self-propagating high-temperature synthesis and mechano-activation processing for new filler creation // *Pre-production in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.9. – pp. 17-22.

4. Mitterer, C., Lenhart, H., Mayrhofer, P.H., Kathrein, M. Sputter-deposited Al–Au coatings // *Intermetallics*. – 2004. – Vol. 12. – P. 579–587.

5. Yakovlev, V.I., Loginova, M.V., Sobachkin, A.V., Dong, Ya., Guriev, A.M. The obtaining of mechanically alloyed nanostructured layered composites and detonation coatings // *Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys : Book of the International seminar articles*. – 2015. – P. 108.

6. Wei, Q. Narayan, J. Superhard diamond-like carbon: preparation, theory, and properties // *International Materials Reviews*. – 2000. – Vol. 45. – P. 133–164.

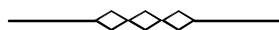
7. Sobachkin, A.V., Yakovlev, V.I., Sitnikov, A.A., Loginova, M.V., Ivanov, S.G., Sviridov, A.P. Piston skirt gas detonation coatings of internal combustion engines based on aluminum-matrix carbon-containing composite material // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2016. – No.7. (139). – pp. 34-38.

8. Sobachkin, A.V., Yakovlev, V.I., Sitnikov, A.A., Loginova, M.V., Ivanov, S.G., Sviridov, A.P. Peculiarities in formation of aluminum-matrix carbon-containing composite material coatings at gas detonation sputtering // *Fundamental Problems of Modern Material Science*. – 2015. – Vol. 12. – No.4. – pp. 444-449.

9. Khrushchov, M.M., Marchenko, E.A., Levin, I.S., Dubravina, A.A., Bukalov, S.S., Tarelkin, Yu.A. Nano-composite structure and tribological properties of diamond-like coatings alloyed with chromium // *Bulletin of Scientific Technical Development*. – 2014. – No.80. – pp. 24-31.

10. Sobachkin, A.V., Sitnikov, A.A., Yakovlev, V.I., Sviridov, A.P. Powder aluminum composites for gas detonation sputtering // *Polzunov Anthology*. – 2017. – No.3. – Vol.1. – pp. 115-119.

Рецензент д.т.н. В.В. Иванайский



УДК 621.7, 621.8, 621.9

DOI: 10.12737/article_5a313b648ec3b1.01351882

А.Н. Шоев, к.т.н.

(Институт технологий и инновационного менеджмента в городе Куляб, Таджикистан)

E-mail: hoev_a@mail.ru

Эффективные технологии повышения долговечности коленчатых и распределительных валов автотракторных двигателей

Рассмотрена одна из основных технологий повышения долговечности коленчатых и распределительных валов автотракторных двигателей – восстановление деталей наплавкой. Выявлен наиболее эффективный способ наплавки по производительности.

Ключевые слова: повышение долговечности деталей; коленвал; распредвал; автотракторный двигатель; наплавка; износ; восстановление деталей.

A.N. Shoev, Can. Eng.

(Institute of Technologies and Innovation Management in Kulyab, Tajikistan)

Efficient technologies for life increase of crankshafts and cam shafts in motor-car and tractor engines

One of the basic technologies for life increase in crankshafts and camshafts of motor-car and tractor engines – parts restoration with welding deposition is considered. The most efficient method of welding deposition in productivity is established.

Keywords: parts life increase; crankshaft; camshaft; motor-car and tractor engines; welding deposition; wear; parts restoration.

Первостепенное значение в задаче повышения износостойкости имеют вопросы расширения номенклатуры и совершенствования технологии восстановления наиболее ответственных, металлоемких, дорогих, ресурсопределяющих деталей сложной конфигурации, к которым относятся коленчатые и распределительные валы двигателей внутреннего сгорания. Их надежность в значительной степени предопределяет работоспособность двигателей в целом.

При капитальном ремонте двигателей для полного восстановления работоспособности и прогнозирования долговечности деталей необходимо восстановить: размеры, геометрическую форму и качество рабочей поверхности.

В данной статье рассмотрен способ восстановления рабочих изношенных поверхностей коленчатых и распределительных валов наплавкой и установлен наиболее эффективный способ наплавки по производительности.

Чтобы создать поверхностный слой с заданными параметрами, используются различные методы обработки – термические, механические, электрофизические, электрохимические и их комбинации. В итоге на поверхности формируется слой от нескольких микрометров до одного миллиметра или более,

имеющий улучшенные характеристики износостойкости и надежности [3].

Восстановление деталей наплавкой – наиболее эффективный и экономичный способ противостояния износу рабочей поверхности. Из-за износа деталей ежегодные убытки в промышленности всех стран мира составляют миллиарды долларов, поскольку при остановках оборудования, связанных с его ремонтом, снижается выпуск продукции. Любая неисправность в каком-либо, пусть незначительном на первый взгляд, элементе может нарушить весь технологический процесс производства [4].

На рис. 1 представлены наплавленный и подлежащий восстановлению распределительные валы дизельного двигателя.

Восстановление наплавкой дает возможность заменить высоколегированную сталь обыкновенной низколегированной или углеродистой сталью. Во время наплавления рабочий слой сплавляется с основным металлом, именно это обеспечивает их наилучшее сцепление. Верхний предел наплавления технологически не может быть ограничен. Однако наименьшая толщина металла, который наплавляют при соответствующих технологиях наплавки, составляет около 0, 25 мм.



Рис. 1. Изношенный и наплавленный кулачки распределительного вала

Если в металле, который наплавляют, нахо-

дятся газовые поры, не проваренные места, шлаковые включения или трещины, то он имеет менее высокую износостойкость, в отличие от ковального или катанного металлов даже при таком же составе и химической структуре. Кроме этого, в детали которую наплавляют, могут проявиться следующие дефекты: незаполненные кратеры, неблагоприятно действующее остаточное напряжение, а также структурные изменения основного металла. В зависимости от способа наплавки усталостная прочность в нем может уменьшиться до 25 %.

На практике применяют следующие режимы наплавки (рис. 2).

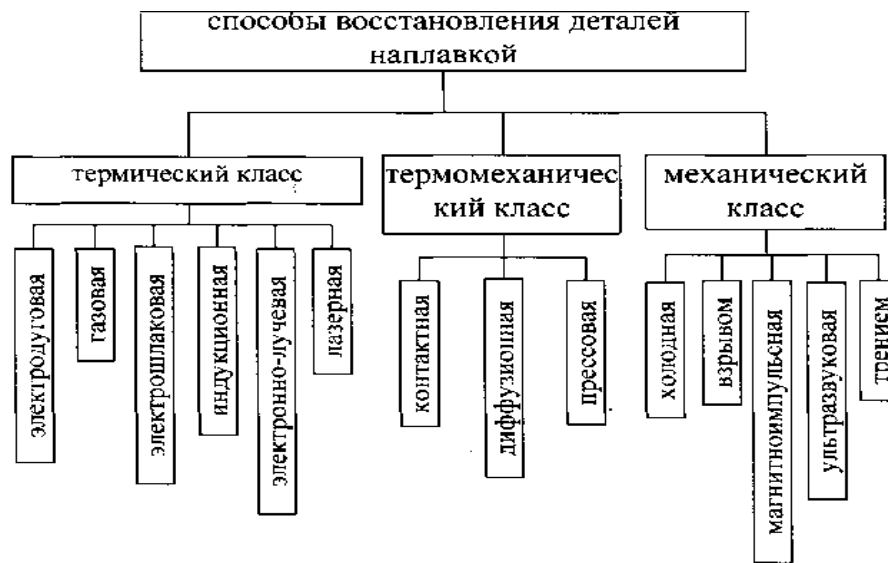


Рис. 2. Классификация способов наплавки

При ремонте наиболее широкое применение получила ручная электро-дуговая наплавка (РНД). Нестабильность качества наплавленного металла, низкая производительность, тяжелые условия труда, необходимость в специальной вентиляции рабочего места являются основными недостатками данного способа [1].

При использовании неплавящихся электродов в зону наплавки вводят металл-присадку в виде порошка или проволоки. Чтобы улучшить качество наплавленного слоя в порошок вводят от 2 до 5 % плавящейся присадки. При этом толщина самого слоя выходит в 2–3 раза меньше чем толщина слоя насыпанного порошка. За каждый проход наплавляют слой не больше чем 2 мм. Однако качество наплавленного металла получается низким за счет неметаллических включений, образования пор и окисления легирующих элементов, а также из-за других дефектов.

Газопламенная наплавка выполняется

вручную ацетиленовой горелкой с проволоочной присадкой. Такой способ наплавки используют, как правило, чтобы получить износостойкий сплав типа стеллит, сормайт и др. Чтобы наплавить такие материалы используют флюсы, за основу которых берут борную кислоту, а также буру. Чтобы восстановить части сложной конфигурации со слоем минимальной толщины, используя при этом газопорошковую наплавку, она дает возможность наплавить (0,1...0,3 мм). Чтобы наплавить используют специальные горелки. Недостаток заключается в том, что в наплавленный слой попадает только 50...60 % от расходуемого материала.

Флюсовая наплавка, несмотря на ряд преимуществ, не дает возможность визуального контроля процесса формирования валиков, она также часто требует применения различных формирующих и флюсоудерживающих устройств.

Довольно затруднительно удалить шлаковую корку с глубокой внутренней поверхности, если применять наплавку на устройствах малого диаметра [4].

Основные характеристики способов наплавки приведены в табл. 1.

1. Характеристики способов наплавки

Способ наплавки	Минимально возможная толщина наплавленного слоя, мм	Производительность наплавки, кг/ч
Ручная электродуговая	5,0	0,8...3,0
Газопорошковая	0,5	До 2
Газопламенная металлизация с оплавлением	0,2	–
Наплавка в CO ₂	1,0...2,0	1,5...8,0
Наплавка порошковой проволокой	1,0...2,0	2,0...9,0
Наплавка порошковой лентой	4,0	12...30
Автоматическая наплавка под флюсом	3,0	2,0...30
Электрошлаковая	10...20	20...60
Индукционная	0,8...3,0	–
Плазменная	3,0...5,0	До 12

Согласно табл. 2, по показателю производительности наиболее эффективным является наплавка в углекислом газе, превосходящая в 6,14 раза показатель электромеханического способа. Тем не менее, для того, чтобы восстанавливать детали с износом 0,2 мм, предпочтительно использовать электромеханическое восстановление и электроконтактную наплавку.

Таким образом, после восстановления деталей и механизмов методом наплавки:

- многократно увеличивается срок службы быстроизнашивающихся и тяжело нагруженных деталей;

- значительно экономит финансовые ресурсы, необходимые для приобретения новых деталей.

В последние годы успешно прогрессирует технология нанесения покрытий напылением с использованием газового пламени (газовая наплавка), плазмы (плазменная наплавка), детонации, а также на основе электронно-лучевого испарения и конденсации материалов в вакууме. Напыление удачно дополняет наплавку и конкурирует с ней в отдельных областях.

2. Производительность способов восстановления деталей

Способ восстановления	Показатели производительности				
	Пг	t _о	t ₀	η _о	Π
Наплавка в углекислом газе	142 8,32	6,32	11,05	0,57	814,14
Вибродуговая наплавка	119 2,55	8,05	13,27	0,61	727,46
Электроконтактная наплавка	282 7,50	3,48	8,13	0,43	350,21
Электромеханическое восстановление	191, 91	7,78	11,34	0,69	132,42

Таким образом, технологическое повышение долговечности коленчатых и распределительных валов автотракторных двигателей может заключаться в использовании наплавки. При этом следует применять наиболее эффективный способ наплавки в углекислом газе, который более чем в 6 раз превышает по производительности все остальные способы.

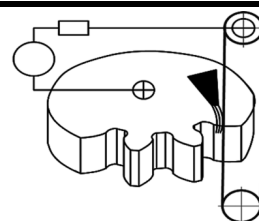
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаров, Ю.А., Ремзин, Е.В., Мусатов, Г.А. Восстановление металлизацией деталей транспортно-технологических машин и комплексов // Молодой ученый. – 2014. – №19. – С. 199–201.
2. Иванов, А.В., Пирозерская, О.Л. Перспективные способы наплавки и механической обработки восстанавливаемых деталей // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2010. – № 3 (13). – С. 7–9.
3. Скобло, Т.С., Тихонов, А.В., Рыбалко, И.Н. Новый способ восстановления деталей // Автомобильный транспорт. – 2012. – Вып. 31. – С. 125–128.
4. Федонин, О.Н. Инженерия поверхности деталей машин с позиции эксплуатационных свойств // Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015) / Матер. 7-й междунар. науч.-техн. конф., г. Брянск, 21-23 сентября 2015 г. – Брянск: БГТУ, 2015. – С. 184–186.

REFERENCES

1. Zakharov, Yu.A., Remzin, E.V., Musatov, G.A. Transport and engineering machinery and complexes parts restoration by metallization // *Young Scientist*. – 2014. – No.19. – pp. 199-201.
2. Ivanov, A.V., Pirozerskaya, O.L. Promising methods of welding deposition and machining of parts restored // *Technical-Processing Problems of Service*. – 2010. – No.3 (13). – pp. 7-9.
3. Skoblo, T.S., Tikhonov, A.V., Rybalko, I.N. New method of parts restoration // *Motor Transport*. – 2012.
4. Fedonin, O.N. Machinery surface engineering in respect to operation properties // Problems in assurance and increase of parts quality and competitiveness in mechanical engineering and aircraft engine production (ТМ-2015) / *Proceedings of the 7-th Inter. Scientific-Tech. Conf.*, Bryansk, September 2015. – BSTU, 2015. – pp. 184-186.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандошко



УДК 621.9.047/048

DOI: 10.12737/article_5a313b64c3ad20.78558022

А.М. Сарсенгалиев, аспирант,

Н.В. Бекренёв, д.т.н.

(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
г. Саратов, ул. Политехническая, д.77)

E-mail: Ajdo5@mail.ru, nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Научная технология с использованием ультразвука при очистке труднодоступных поверхностей деталей сложной формы*

Проанализирована техническая проблема обеспечения ресурса деталей топливной аппаратуры и систем транспортировки природного газа с учетом их загрязнения в процессе изготовления и эксплуатации. Показана перспективность удаления загрязнений методом ультразвуковой очистки. Предложен и экспериментально подтвержден метод повышения эффективности ультразвуковой очистки указанных поверхностей до 10 раз путем сообщения изделию ультразвуковых колебаний непосредственно в зоне локализации загрязнений.

Ключевые слова: ультразвук; производительность очистки; кавитация; загрязнения; контакт; циклическое нагружение.

A.M. Sarsengaliyev, Post graduate student,

N.V. Bekrenyov, D. Eng.

(Gagarin State Technical University of Saratov 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov)

Science intensive technology with ultrasound use at hard-to-reach surface refinement in complex parts

A technical problem in assurance of life in parts of fuel equipment and a system of natural gas transportation is analyzed taking into account their pollution in the course of manufacturing and operation. An outlook in decontamination by a method of ultrasonic refinement is shown.

There is offered and proved experimentally a method for ultrasonic refinement efficiency increase up to 10 times for the surfaces mentioned above by means of imparting ultrasonic oscillations to a product directly in the area of pollution detections.

Keywords: ultrasound; refinement productivity; cavitation; pollutions; contact; cyclic loading.

Современное транспортное и энергетическое машиностроение характеризуется применением в перспективных двигателях, топливно-распределительных системах и устройствах транспортировки энергоносителей (например – природного газа) изделий, обладаю-

щих сложной конструкцией. Например, в распылителях топлива сопряжение «игла – корпус» имеются зазоры не более нескольких микрометров, изменение которых приводит к нарушению нормальной работы по впрыску топлива. В процессе функционирования в отверстиях и зазорах скапливается нагар, что приводит к разрегулировке системы. Вследствие высокой трудоемкости изготовления подобных изделий, замена загрязненных распылителей новыми сопряжена с большими затратами труда и денежных средств.

Транспортировка природного газа обеспе-

* Исследования выполнялись при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (контракт №0015494 «Разработка ультразвуковой технологии восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов»).

чивается газоперекачивающими агрегатами (ГПА). В настоящее время используются два типа ГПА: с насосами с электроприводом и с насосами, в качестве привода которых используются конверсионные газотурбинные двигатели.

Одними из основных элементов газотурбинных установок ГПА являются камеры сгорания. Паспортными данными регламентируются определенная мощность, частота вращения ротора турбин высокого и низкого давления, а также выбросы в окружающую среду соединений классов COx и NOx. Опыт эксплуатации горелочных устройств на компрессорных станциях выявил некоторые особенности применения данных систем.

Горелочные устройства имеют до 140 рабочих разнонаправленных отверстий малого диаметра (0,8...1,0 мм). В процессе эксплуатации происходит отложение соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и отверстий. Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также повышенному содержанию соединений COx и NOx, что сказывается отрицательно на экологических показателях агрегата.

Отмеченные нарушения проявляются задолго до выработки горелочным устройством паспортного ресурса, что вызывает необходимость замены комплекта этих устройств на новый и дополнительные финансовые расходы для компрессорной станции, что в конечном итоге увеличивает оплату услуг по транспортировке газа для потребителей.

Решить указанные проблемы можно путем восстановления загрязненных изделий методами очистки.

В различных отраслях машино- и приборостроения, начиная с середины XX в., успешно применяется метод ультразвуковой очистки, который является наиболее эффективным и качественным среди других методов (химического, механического, плазменного и др.). Научные аспекты ультразвуковой кавитации и ее применения при обработке в жидких средах изучены Б.А. Агранатом, Ф.Ф. Брониним, Е.С. Киселевым, М.А. Маргулисом, М.А. Промтовым, В.М. Приходько, М.Г. Руденко, И.А. Сироткиным, В.Н. Хмелевым и др.

Разработана теория ультразвуковой кавитации при различных температурных условиях, плотностях моющих сред, интенсивности ультразвука и его частоты. Исследовано и доказано положительное влияние частотной мо-

дуляции ультразвуковых колебаний на эффективность ультразвуковой обработки и очистки. Разработаны и выпускаются серийно ультразвуковые ванны различной мощности и вместимости, а также автоматизированные моечно-очистные комплексы, в том числе использующие многочастотное ультразвуковое воздействие и «качание» частоты вблизи среднего заданного уровня [1].

Однако результаты данных исследований применимы в основном для очистки внешних поверхностей или относительно «открытых» внутренних полостей. Процессы развития кавитации в малогабаритных «скрытых» внутри корпуса полостях и разнонаправленных каналах малого диаметра малоинтенсивны и не позволяют эффективно удалять загрязнения, альтернативные ультразвуковые методы очистки таких поверхностей изучены недостаточно. Также не рассмотрены вопросы сохранения целостности тонкостенного собранного при помощи сварки изделия при воздействии на него мощного ультразвука, интенсивностью, достаточной для очистки «скрытых» каналов.

Авторами выполнены теоретические и экспериментальные исследования, позволившие обосновать новую технологическую схему ультразвуковой очистки, сочетающую объемную кавитационную очистку с локализованным в месте залегания загрязнений контактным воздействием ультразвука [2 – 7].

Целью исследования явилось повышение эффективности и качества ультразвуковой очистки закрытых полостей и каналов малого диаметра в деталях машиностроения сложной формы типа горелочных устройств и распылителей топлива на основе обоснования технологии, включающей сочетание общего кавитационного и локализованного в загрязненной зоне контактного вибровоздействия с учетом собственных резонансных частот изделия.

Для достижения поставленной цели предложен следующий подход:

- изучение химического состава загрязнений с целью определения основного метода их разрушения и удаления;
- изучение распределения загрязнений по поверхности каналов и отверстий; изучение форм собственных колебаний изделия при различных частотах и выявление частот, генерирующих такое распределение деформаций поверхности изделия, при котором пучности оказываются в наиболее загрязненных зонах;
- введение изделия в контакт с ультразвуковым преобразователем с определенным

усилием и сообщением колебаний изделию на установленной на основе моделирования частоте с одновременной кавитацией объема жидкости и ее прокачкой через каналы для эффективного вымывания отслоившихся загрязнений.

Исследования проводили следующим образом. Сначала разработали феноменологическую модель, позволяющую по заданной величине изгибных напряжений в корпусе изделия, превышающей адгезионную прочность слоя загрязнений, но меньшей, чем длительный предел выносливости материала, определять амплитуду ультразвукового воздействия. Затем выполняли компьютерное моделирование деформаций корпуса изделия на различных частотах, позволяющих выявить частоты с локализацией пучностей колебаний непосредственно в зонах наибольшей интенсивности загрязнений. Далее проводили экспериментальные исследования.

Исследования проводили на примере горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на специально разработанной установке с электромеханическим преобразователем на основе пяти пьезокерамических излучателей, соединенных с общим ступенчатым кольцевым волноводом с питанием от генератора УЗГИ1-2.5(1)(1.5)(2) производства ООО «Ультразвук-ТЕО» (г. Саратов) мощностью 1,0 кВт и частотой 22 кГц $\pm 7,5\%$. Химический состав отложений в каналах исследовали методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа при помощи растрового электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan), оснащенного химическим анализатором INCA PentaFETx3 (Oxford).

Внешний вид поверхностей каналов и полостей оценивали при помощи компьютерного анализатора изображений АГПИМ-6М. Измерение вибрационных и шумовых характеристик изделия и торца волновода в процессе очистки проводили при помощи компьютерного виброакустического комплекса ВК-01. Фактическую частоту колебаний напряжения генератора, поступающего на излучатели измеряли частотомером ЧЗ-34. Амплитуду колебаний волновода на холостом режиме и под нагрузкой измеряли индуктивным датчиком с усилителем типа 214 по шкале с ценой деления 0,5 мкм.

Качество очистки каналов и отверстий оценивали при помощи специального стенда по скорости набора давления воздуха равного 400 Н/мм² в герметичном баллоне, куда последовательно помещали горелочные устрой-

ства после эксплуатации и после цикла очистки. Предварительно качество очистки оценивали по расходу воды (2 л), заливаемой в центральный подводящий канал горелочного устройства. Интенсивность удаления загрязнений определяли путем взвешивания образцов-имитаторов до и после цикла очистки на электронных весах RM200 с точностью 0,0001 г.

Моделирование собственных частот колебаний и напряженно-деформированного состояния обрабатываемого элемента детали в зависимости от условий обработки и выполняли методом конечных элементов в программной среде APM Winmashine (модуль Structure-3D).

Было допущено, что причиной разрушения последних являются внутренние напряжения, возникающие под действием кавитации или, соответственно, изгибных высокочастотных колебаний очищаемой поверхности. При этом считали, что условием разрушения является превышение уровня напряжений над уровнем адгезионной прочности слоя загрязнения. Получено выражение, связывающее величину напряжений с амплитудой ультразвуковых колебаний и конструктивными особенностями очищаемого объекта:

$$\sigma_{F1} = \frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1-C^4)}, \quad (1)$$

где C – коэффициент динамической силы ультразвука; A – амплитуда ультразвуковых колебаний; l – длина элемента конструкции, подвергаемого воздействию; D – наружный диаметр элемента конструкции; $C_1 = d / D$ – соотношение диаметров очищаемого канала d и наружного диаметра.

Расчетом по зависимости получен график (рис. 1), позволивший установить диапазон параметров эффективной контактной очистки с учетом адгезионной прочности загрязнений 12...15 Н/мм² (максимальные значения по априорной информации).

В программной среде APM Winmashine проведено на твердотельной 3D модели изделия определение собственных частот колебаний и выявлено положение их пучностей, установлено распределение полей деформаций и полей напряжений. По результатам анализа найдены режимы ультразвукового воздействия, при которых теоретически деформации в местах концентрации напряжений минимальны, а пучности амплитуды смещения располагаются вблизи областей максимальной загрязненности.

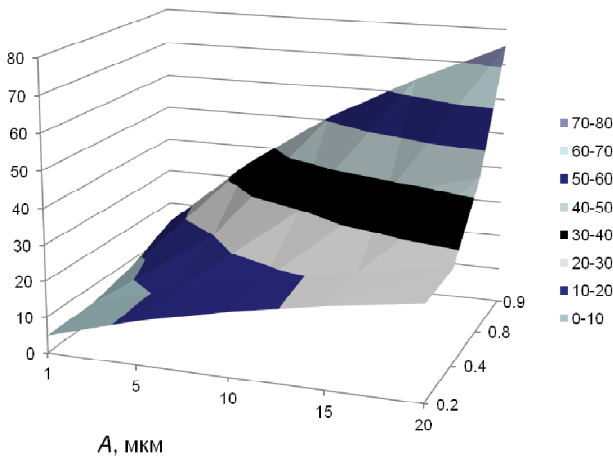


Рис. 1. Изгибные напряжения σ_F в трубчатой конструкции, подвергнутой воздействию ультразвука, в зависимости от амплитуды A и соотношения диаметра канала и наружного диаметра C_1

Конечно-элементная сетка (сторона 3 мм) горелочного устройства в области газоотводящих трубок представлена на рис. 2, а, диаграмма напряжений деформированного состояния при различных параметрах вибрационного нагружения горелочного устройства – на рис. 2, б, принятая за оптимальную диаграмму форм собственных колебаний в ультразвуковом диапазоне частот – на рис. 3.

При частотах порядка 22 000 Гц интенсивно деформируется центральный корпус, но трубки остаются мало деформированными, т.е. очистка внутренних полостей возможна лишь частично. При 23 000...23 300 Гц происходит деформация, как центрального корпуса, так и трубок, но хвостовая часть остается мало затронутой деформациями.

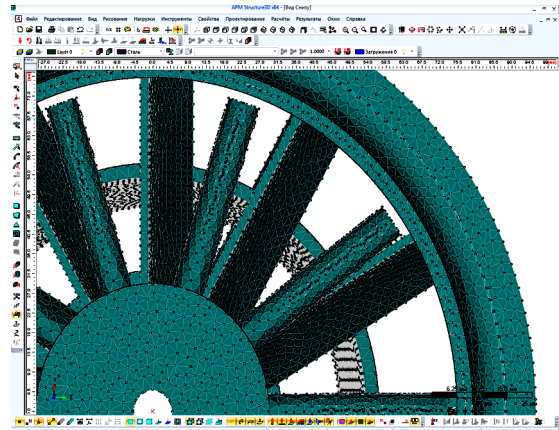
Исследовали возможности восстановления пропускной способности каналов горелочного устройства путем ультразвуковой очистки. При этом рассматривали следующие возможные схемы:

- «традиционная» очистка за счет кавитации в объеме моющей жидкости, в которую помещено горелочное устройство;
- очистка с ультразвуковым нагружением горелочного устройства, помещенного в моющую жидкость, на оптимальной для кавитации частоте ультразвука;
- очистка с ультразвуковым нагружением горелочного устройства, помещенного в моющую жидкость, на произвольной частоте ультразвука.

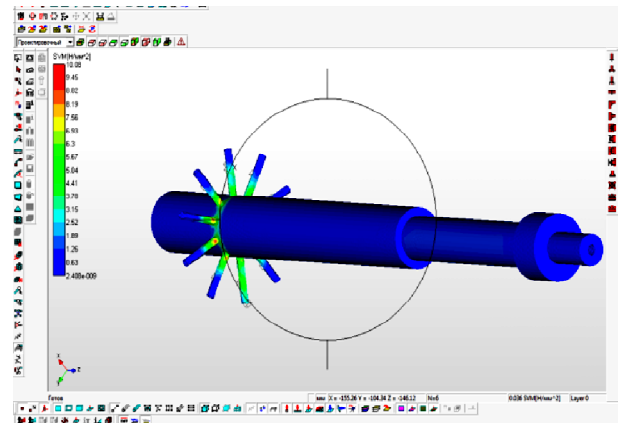
Предварительные обобщенные результаты представлены на рис. 4.

A – общая очистка за счет кавитации в объеме жидкости ($f = 22,4$ кГц); B – очистка контактным методом при максимальной интенсивности кавитации ($f = 22,5-23,0$ кГц); C – очистка контактным методом при $f = 21,5$ кГц.

Установлено, что наибольшая эффективность очистки наблюдается на неоптимальной для интенсивной кавитации (в данных условиях) частоте около 21,5 кГц, при $f < 21$ кГц и $f > 22,4$ кГц эффективность очистки резко снижается.



а)



б)

Рис. 2. Конечно-элементная сетка в области газоотводящих трубок (а) и карта деформаций в центральном теле и трубках (б)

С целью выявления механизма данного факта исследовали кинетику удаления загрязнений из «скрытых» полостей и каналов при использовании объемной кавитационной очистки и контактного воздействия ультразвукового преобразователя.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных аппроксимирующие функции процессов имеют следующий вид:

$$\Delta Q_o = 0,0012 A^{0,731} t^{0,165} \quad (2)$$

$$\Delta Q_K = 0,015A^{1,19}t^{0,238} \quad (3)$$

где ΔQ_o и ΔQ_K – изменение веса образцов-имитаторов после очистки по известной схеме объемной очистки и по предлагаемой схеме соответственно; A – амплитуда колебаний торца ультразвукового преобразователя; t – время очистки.

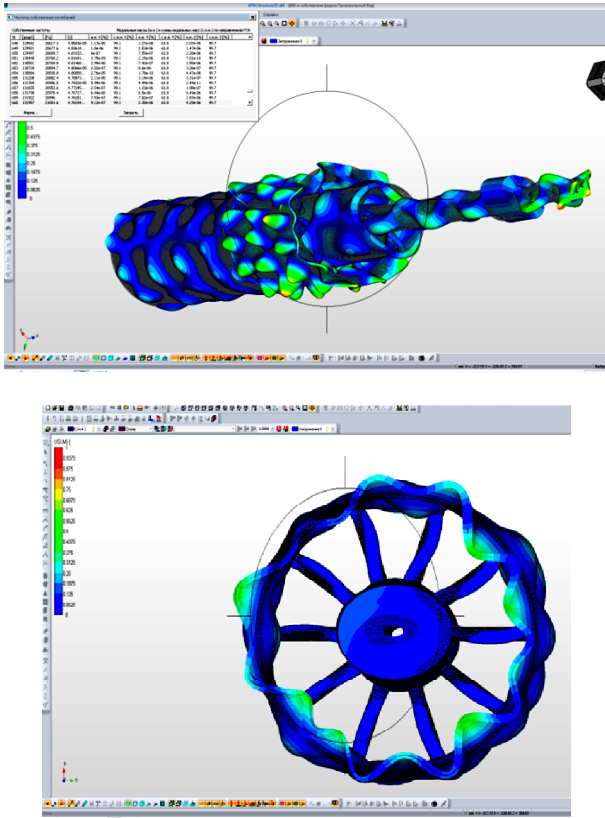


Рис. 3. Колебания элементов горелочного устройства при частоте вынуждающей силы 21 001 Гц

Снижение времени накачки баллона через горелочное устройство от исходного состояния, %

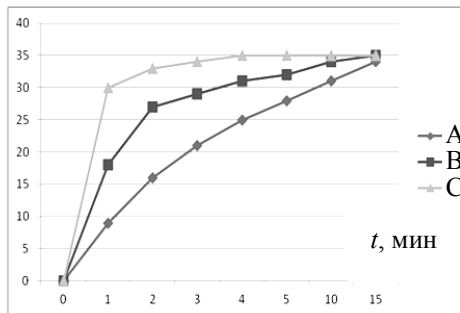


Рис. 4. Исследование кинетики ультразвуковой очистки каналов различными методами

Результаты расчетов по (2) и (3) представлены на рис. 5.

Видно, что при изменении схемы очистки сохраняется общий характер зависимостей, но при этом влияние амплитуды колебаний пре-

образователя существенно (на 62 %) выше. Объяснить данный эффект можно исходя из изменившегося механизма разрушения загрязнений.

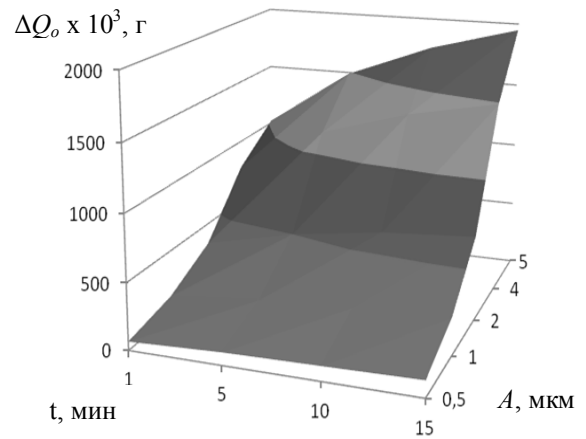
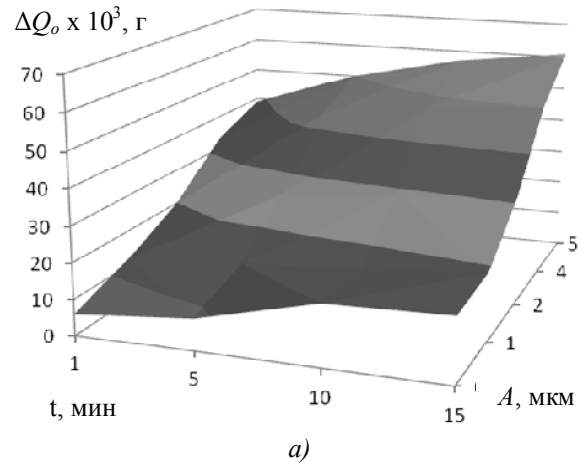


Рис. 5. Зависимость изменения веса образца от схемы и режимов ультразвуковой очистки: объемная кавитация (а), контактное воздействие (б)

При объемной очистке «работает» кавитационный механизм воздействия ударных волн и мгновенных температур схлопывающихся микропузырьков на загрязнения, что приводит к скалыванию микрочастиц загрязнений, проникновению жидкости в трещины и поры согласно эффекту Ребиндера и отслоению фрагментов.

В «скрытых» зонах, несмотря на внешнюю интенсивность ультразвука, кавитация мало интенсивна, энергия пузырьков и их количество резко падают по мере удаления от входных кромок отверстий и каналов. Это приводит к снижению эффективности разрушения агломератов и слоев загрязнений.

При контактной схеме непосредственно поверхность изделия, покрытая загрязнениями, испытывает высокочастотные волновые де-

формации, что способствует возникновению внутренних напряжений и усталостных трещин в агломератах и слоях загрязнений. В результате происходит резкое снижение адгезивно-когезионной прочности загрязнений и разрушение достаточно крупных их фрагментов, сопровождающееся уже упомянутым выше эффектом Ребиндера. Таким образом, в единицу времени происходит удаление больших масс материала.

В ходе экспериментальных исследований по отработке комбинированной технологии очистки определен рациональный диапазон частот механических колебаний волновода по критериям максимального значения виброускорения и минимального уровня звукового давления (рис. 6).

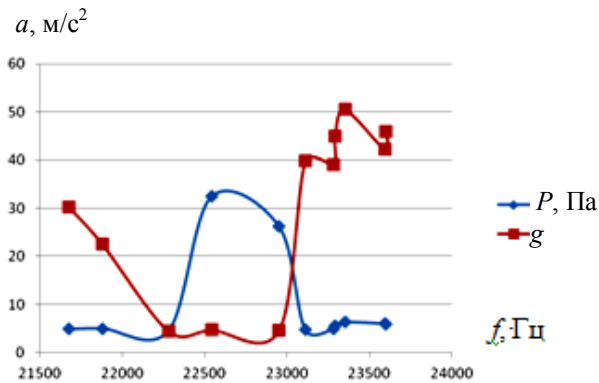


Рис. 6. Изменение значений виброускорения a звукового давления p на расстоянии 0,5 м от ультразвуковой ванны в зависимости от частоты подаваемого на преобразователь напряжения (нагрузка 120 Н)

Видно, что наибольшие значения виброускорений соответствуют частоте около 23 300 Гц. При этом кавитационные эффекты менее заметны, чем на частотах 22 500...23 000 Гц. В тоже время параметры звукового давления минимальны. В области частот кавитации наблюдается возрастание звукового давления почти в 3,5 – 4 раза. Фактические максимальные значения давления составляют 9,0...9,5 Па, что примерно соответствует значениям 100...105 дБ, являющимся предельно допустимыми в третьоктавных полосах при частотах 20...25 кГц. На частоте порядка 21 500 Гц наблюдается второй пик виброускорения при минимальном звуковом давлении. Аналогичные результаты получены при нагрузке 85 Н.

Отличие состоит в смещении области высокого звукового давления в диапазон более высоких частот. Таким образом, подтверждается целесообразность использования полу-

ченной при моделировании и теоретическом расчете частоты колебаний преобразователя 21,0...21,5 кГц. Этим же объясняется большая эффективность очистки в некавитационном режиме (см. рис. 4). Колебания активной накладки, разработанной авторами колебательной системы, сообщаются пятью пьезокерамическими излучателями. С целью расширения номенклатуры очищаемых изделий стакан выполнен волновой длины с отверстием, диаметр которого ступенчато уменьшается от выходного торца к входному, с расположением ступени на расстоянии $1/2\lambda$ от выходного торца. Наружная поверхность стакана также ступенчатая с расположением ступени на расстоянии $1/4\lambda$ от выходного торца.

Такая конструкция обеспечивает высокую интенсивность колебаний, приводящую даже к образованию поверхностных волн (рис. 7). С целью снижения нагрузки на активную накладку объем жидкости рекомендуется таким, чтобы выходной торец накладки был покрыт слоем 10...15 мм.

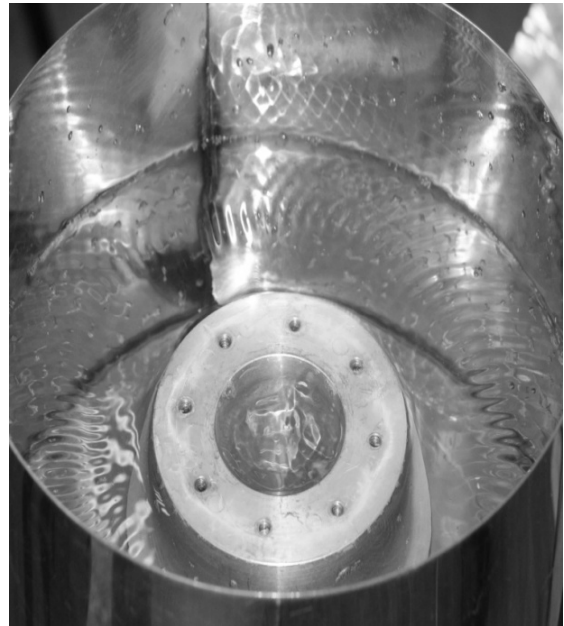


Рис. 7. Акустические волны на поверхности жидкости над волноводом при рациональной интенсивности ультразвука

Особенностью разработанной установки (рис. 8) является применение автоматизированного цикла очистки по контролю текущего расхода моющей жидкости через очищаемое горелочное устройство при помощи ультразвукового расходомера с микроконтроллером, обеспечивающим погрешность измерений не более 1 %, шкафа для размещения ультразвуковой ванны на виброопорах с эффективной

шумоизоляции на основе базальтовых нитей, использование специальной активной накладки преобразователя в виде ступенчатого стержня волновой длины.



Рис. 8. Автоматизированная установка комбинированной очистки (шумоизолированный шкаф с ультразвуковым устройством открыт)

Таким образом, в результате исследования получены теоретические зависимости, позволяющие определить амплитуду колебаний ультразвукового преобразователя, обеспечивающую изгибные напряжения в конструкции изделия, превышающие адгезионную прочность слоя загрязнений и обоснованы технологические режимы ультразвуковой комбинированной очистки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам: частота ультразвука 21,0...21,5 кГц при выходном токе генератора 1,0...1,2 А; расход моющей жидкости 1,4...1,5 м³/ч; температура моющей жидкости 40...55 °С; усилие прижатия изделия к торцу активной накладки ультразвукового преобразователя 80...120 Н, позволившие восстановить пропускную способность изделий на 97...98 % и обеспечить их повторное использование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бржозовский, Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – 348 с.
2. Сарсенгалиев, А.М. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных уст-

ройств газоперекачивающих агрегатов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 2(56). – С. 39–43.

3. Сарсенгалиев, А.М. Оптимизация технологии и разработка установки комбинированной ультразвуковой очистки горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам на основе компьютерного моделирования звуковых полей и полей напряжений // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2013. – № 13-1 (59). – С. 89–92.

4. Сарсенгалиев, А.М. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2014. № 11 (70). С. 6-12.

5. Сарсенгалиев, А.М. Исследование ультразвуковой очистки внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения контактным методом // Вопросы электротехнологии. – 2016. – № 1 (10). – С. 35–42.

6. Сарсенгалиев, А.М. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов в процессе ультразвуковой контактной очистки / Информационно-коммуникационные технологии в науке, производстве, образовании (ICIT-2016) // Сб. материал. Междунар. научно-техн. конф., СГТУ им. Гагарина Ю.А., ООО Издательство «Научная книга (Воронеж)», – 2016.

7. Сарсенгалиев, А.М. Обоснование контактного метода ультразвуковой очистки труднодоступных внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения // Вопросы электротехнологии. – 2017. – № 1 (15). – С.13–17.

REFERENCES

1. Brzhozovsky, B.M. *Ultrasonic Engineering Processes and Equipment in Mechanical Engineering and Instrument Making Industry*: manual. Saratov: Saratov State Technical University, 2009. – pp. 348.

2. Sarsengaliev, A.M. New ultrasonic technology for burner device working capacity restoration of gas-compressor units // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.2(56). – pp. 39-49.

3. Sarsengaliev, A.M. Technology optimization and development of plant for combined ultrasonic cleaning of burner devices to gas-compressor units based on computer simulation of sound and stress fields // *Mathematical Methods in Engineering and Technologies*. – ММТТ. – 2013. – No.12-1 (59). – pp. 89-92.

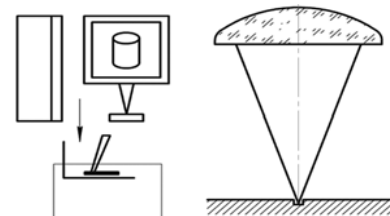
4. Sarsengaliev, A.M. New ultrasonic technology for working capacity restoration of burner units // *Mathematical Methods in Engineering and Technologies* – ММТТ. 2014. No.11 (70). – pp. 6-12.

5. Sarsengaliev, A.M. Investigation of ultrasonic cleaning of inner cavities and channels by contact method of transport and power engineering products // *Problems of Electrotechnology*. – 2016. – No.1 (10). – pp. 35-42.

6. Sarsengaliev, A.M. Computer simulation of stress-strain state of burner units in gas-compressor units during ultrasonic contact cleaning / Information-communication Technologies in Science, Production, Education (ICIT-2016) // *Proceedings of the Inter. Scientific. Tech. Conf., Gagarin STU of Saratov*, “Scientific Book” Publishing House (Voronezh), - 2016.

7. Sarsengaliev, A.M. Substantiation of contact method for ultrasonic cleaning of hard-to-reach inner cavities and channels in products of transport and power engineering // *Problems of Electrotechnics*. – 2017. – No.1 (15). – pp. 13-17.

Рецензент д.т.н. Д.С. Фатюхин



УДК 67.02

DOI: 10.12737/article_5a313b650da070.69097320

И.Е. Малов, к.т.н.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5)

E-mail: ltrp@rambler.ru

Исследование применимости технологии лазерного управляемого термораскалывания для изготовления элементов термооптического покрытия радиаторов космических аппаратов

Проведены исследования влияния параметров лазерного излучения на качество торцевых поверхностей стеклянных элементов термооптического покрытия радиаторов космических аппаратов, получаемых методом управляемого термораскалывания. Показано существенное повышение качества поверхностей раздела при использовании метода сквозного управляемого термораскалывания.

Ключевые слова: термораскалывание; точность разделения; шероховатость; лазер.

I.E Malov, Can. Eng.

(FSBEI HE Bauman STU of Moscow, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow 105005)

Applicability investigations of laser-controlled thermo-splitting technology for manufacturing elements of thermo-optical coating for spacecraft radiators

In view of a responsible destination and hard operation conditions strong technical requirements are made to glass elements of a thermo-optical coating for spacecraft radiators where a basic requirement of them is absence of chips and micro-cracks. There are carried out investigations of the influence of laser radiation parameters upon end face quality in the in glass element obtained through the method of controlled thermo-splitting. A quality considerable increase is shown in the surfaces of division at the use of the method of the end-to-end laser controlled thermo-splitting in comparison with the methods of part-through laser controlled thermo-splitting and scribing with a diamond cutter with the further after-break.

Keywords: thermo-splitting; division accuracy; roughness; laser.

Современная промышленность в России и мире все более становится инновационной, происходит быстрое переоснащение производства высокопроизводительным оборудованием основанном на использовании последних научных достижений, включая и лазерные технологии.

Лазеры достаточно широко представлены в современных промышленных технологиях. Они применяются практически во всех значимых областях современной промышленности, от простейших деталей и раскроя бумажной

упаковки до самых современных применений в медицине и космической промышленности. Применение высокоэффективных лазерных технологий в обработке материалов позволяет повысить точность и качество получаемых изделий недостижимыми другими методами обработки.

В настоящее время успешно развиваются нанотехнологии и общая миниатюризация промышленных изделий, в том числе и в космической промышленности. Проектанты и конструктора летательных и космических ап-

паратов постоянно стремятся уменьшать размеры и вес служебной аппаратуры с целью увеличения массы полезной нагрузки, увеличения качества и надежности космической техники.

Появляются новые конструкторские решения, элементная база, конструкционные материалы. В космических аппаратах все в большем масштабе применяются приборы и узлы (оптические приборы, дисплеи, микроэлектронные сборки на основе сапфира, термооптическое покрытие и многое другое), содержащие хрупкие неметаллические материалы. Одним из таких материалов является стекло. Это обусловлено его уникальными свойствами: электроизоляционными, вакуумными, теплоизоляционными, прозрачностью в широком диапазоне спектра, достаточной прочностью, стойкостью против воздействия окружающей среды и многих химически активных сред, технологичностью, позволяющей относительно простыми средствами изготавливать детали самой различной формы и назначения [1 – 3].

Одной из актуальных задач в космической промышленности является изготовление термооптического покрытия радиаторов космических аппаратов, собираемых из отдельных стеклянных пластин размером 40×40×0,17 мм. В связи с ответственным назначением и тяжелыми условиями эксплуатации (температура от -150 до +150 °С; радиация 10 рад; вакуум $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па; ударные нагрузки и вибрации), к пластинам предъявляются высокие технические требования: предельные отклонения размеров $\pm 0,1$ мм, шероховатость Ra не более 1,3 мкм, отсутствие сколов и микротрещин.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество контактных и бесконтактных способов разделения стеклянных изделий. К контактным методам, которые используют механическое воздействие на стекло, относят: резку алмазными пилами, скрайбирование алмазными резцами, гидроабразивную, пескоструйную резку. К бесконтактным методам можно отнести: лазерную резку, лазерное скрайбирование, лазерное термораскалывание, разделение с использованием нелазерных источников нагрева (мощные лампы, газовые горелки, электронагреватели и т.д.). Эти методы характерны тем, что разделение осуществляется посредством теплового воздействия на стекло.

В последнее время разрабатываются и применяются гибридные методы разделки стекла, с использованием нескольких различных ме-

тодов обработки, например гидролазерная резка, лазерное скрайбирование с последующим механическим доколом, лазерно-ультразвуковая резка и некоторые другие, более редкие способы.

Далеко не каждый из перечисленных методов способен обеспечить выполнение технических требований предъявляемых к стеклянным элементам термооптического покрытия космических аппаратов. Наиболее перспективным методом для решения задачи размерной обработки данных изделий, является управляемое лазерное термораскалывание. Данный метод применим для размерной обработки не только стекла, но и таких хрупких неметаллических материалов, как сапфир, различные типы керамики и др.

Данный метод обладает рядом достоинств в сравнении с другими известными способами обработки: высокая точность при размерной обработке, низкая энергоемкость процесса, высокая чистота, основанная на безотходности процесса разделения, нулевая ширина реза, высокое качество кромок (отсутствие сколов и микротрещин), повышение в несколько раз механической прочности получаемых изделий.

Метод управляемого лазерного термораскалывания (УЛТ) заключается в том, что разделение материала происходит за счет образования разделяющей трещины под действием напряжений растяжения, возникающих при нагреве материала лазерным излучением и последующем охлаждении зоны нагрева, т.е. при наличии высокого температурного градиента.

Под действием лазерного излучения на стеклянное изделие и последующее его охлаждение в стекле возникают термонапряжения, состоящие из продольной σ_x , поперечной σ_y и глубинной σ_z составляющих. Разделение стекла вдоль направления движения лазерного луча происходит под действием поперечной составляющей σ_y , так как в процессе перемещения лазерного луча поперечные составляющие складываются, образуя поперечное усилие, в результате которого, при превышении предела прочности стекла, образуется разделяющая трещина.

Необходимым условием качественного термораскалывания является значительный уровень поперечной составляющей напряжений, что обеспечивается эллипсоидной формой сечения лазерного луча и перемещением его по линии разделения (рис. 1).

Управление разделяющей трещиной осуществляется перемещением лазерного луча

вдоль поверхности образца. Луч создаёт в нём такое распределение напряжений, при котором трещина распространяется по траектории, пройденной лучом, отставая от него на некоторое расстояние. В результате стекло разделяется по описываемому лазерным лучом контуру. Температура, при которой возможно зарождение трещины должна превышать предел термостойкости стекла, но не доходить до температуры стеклования.

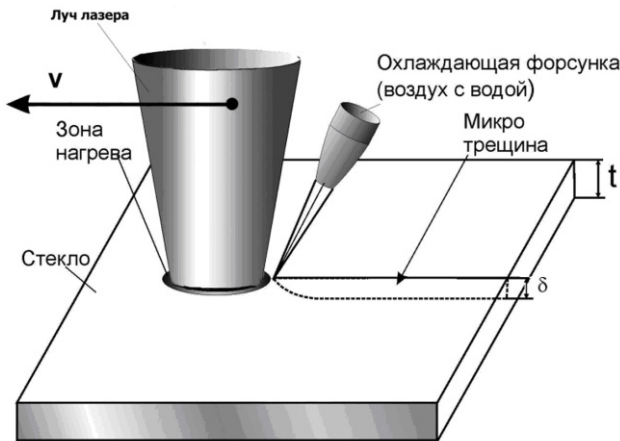


Рис. 1. Схема процесса управляемого лазерного термораскалывания

Для создания более высокого температурного градиента можно использовать хладагент, подаваемый вслед движущемуся по поверхности стекла лазерному лучу. Существующие технологии УЛТ основаны на применении излучения CO_2 ($\lambda = 10,6$ мкм) и Nd:Yag ($\lambda = 1,06$ мкм) лазеров и позволяют успешно разделять как очень тонкие (50 мкм), так и очень толстые (более 20 мм) стекла и изготавливать высокопрочные, достаточно точные (для размерной обработки) изделия [4, 5].

Чтобы оценить возможность применения технологии управляемого лазерного термораскалывания для изготовления элементов термооптического покрытия радиаторов космических аппаратов были проведены исследования на лабораторной установке оснащённой CO_2 лазером мощностью 50 Вт.

Основными варьируемыми параметрами являлись: длина эллиптического лазерного пятна, мощность лазерного излучения и скорость обработки. Результаты экспериментов представлены в виде графиков на рис. 2. Из графиков видно, что для обработки стекла толщиной 0,17 мм варьировать эти параметры можно в очень небольших пределах.

Наименьшая шероховатость реза получает-

ся на скорости 110 мм/с при длине эллиптического пятна 7 мм (кривая – Пучок 3, рис. 2). При длине пятна 6 мм (кривая – Пучок 2) наименьшая шероховатость получается выше, и при длине пятна 5 мм (кривая – Пучок 1) наименьшая шероховатость достигается при скорости разделения 120 мм/с и имеет максимальное значение.

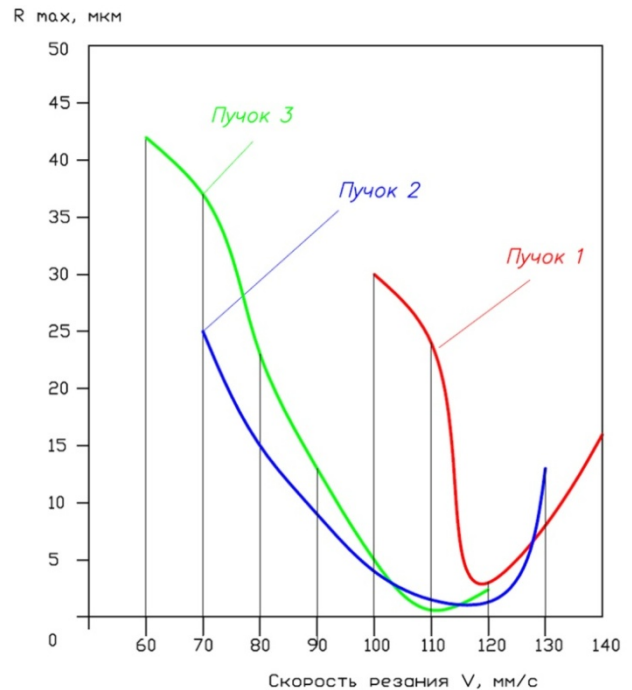


Рис. 2. Зависимость R_{max} от скорости резания и формы пучка при мощности лазерного луча 45Вт

Поскольку качество торцов исследуемых изделий является одним из важнейших факторов, обеспечивающих прочность изделия в целом, результаты размерной обработки методом сквозного лазерного управляемого термораскалывания были сопоставлены с результатами разделения такими методами, как несквозное лазерное управляемое термораскалывание с последующим доломом и скрайбирование алмазным резцом с последующим доломом.

Определение качества торцов стекол, разделенных различными методами, осуществлялось в ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», на кафедре «Измерительных информационных систем и технологий». Измерения проводились контактным методом, на профилометре-профилографе мод. 252, производства завода «Калибр».

Результаты измерений представлены на рис. 3–5. Из представленных данных видно, что наименьшей шероховатостью обладают образцы, полученные методом сквозного лазерного управляемого термораскалывания.

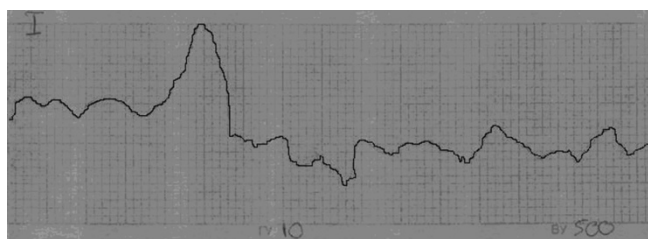


Рис. 3. Профиль поверхности разделения после алмазного скрайбирования с последующим доломом

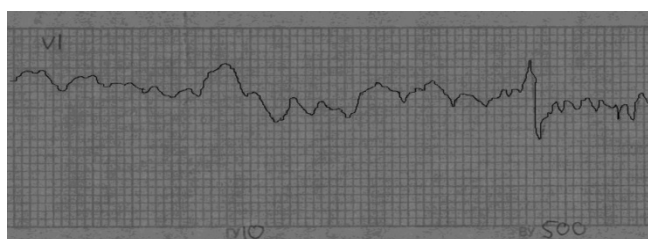


Рис. 4. Профиль поверхности разделения после несквозного лазерного управляемого термораскалывания с последующим доломом

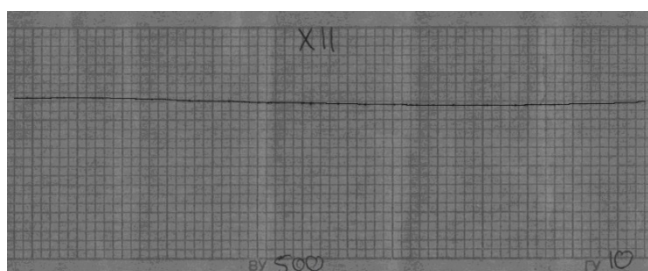


Рис. 5. Профиль поверхности разделения после сквозного лазерного управляемого термораскалывания

Значения шероховатости Ra и $Rmax$, приведены в табл. 1:

Таблица шероховатости торцов стеклянных образцов

Способ разделения	Ra , мкм	$Rmax$, мкм
Алмазное скрайбирование с последующим доломом	11	39
Несквозное лазерное управляемое термораскалывание с последующим доломом	1,3	4,7
Сквозное лазерное управляемое термораскалывание	0,053	0,15

Метод сквозного лазерного управляемого термораскалывания позволяет на несколько порядков уменьшить шероховатость поверхностей разделения, что, в свою очередь, положительно сказывается на прочности получаемых изделий, их виброустойчивости, а также позволяет отказаться от последующих операций обработки кромок.

Кроме того стекла, разделённые данным методом, имеют более аккуратные кромки, что позволяет укладывать их плотнее.

В космической промышленности, где большую цену имеет буквально каждый лишний грамм и миллиметр, выведенный в космос, это является важным преимуществом перед другими методами обработки.

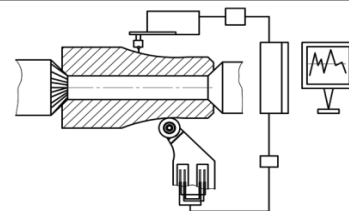
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла // М.: Советское Радио. – 1979. – С.136.
2. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюрлов, А.И. Технологические процессы лазерной обработки // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2006. – 664 С.
3. Стекло: справочник; под ред. Н.М. Павлушкина. – М.: Стройиздат. – 1973. – 487 С.
4. Сысоев, В.К., Булкин, Ю.Н., Вятлев, П.А., Захарченко, А.В. Выбор оптимального лазерного источника для управляемого термораскалывания оксидных стекол // Стекло и Керамика. – 2007. – № 6. – С. 3–6.
5. Сысоев, В.К., Вятлев, П.А. Технологические характеристики процесса лазерного термораскалывания // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2008. – Т.51, № 4. – С. 48–50.

REFERENCES

1. Machulka, G.A. Glass laser processing // М.: Soviet Radio. – 1979. – pp. 136.
2. Grigoriyants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. Engineering Procedures of Laser Processing // М.: Bauman STU Publishers. – 2006. – pp. 664.
3. Glass: reference book: under the editorship of N.M. Pavlushkin. – М.: Stroyizdat. – 1973. – pp. 487.
4. Sysoiev, V.K., Bulkin, Yu.N., Vyatlev, P.A. Zakharchenko, A.V. Choice of optimum laser source for oxide glass controlled thermo-splitting // Glass and Ceramics. – 2007. – No.6. – pp. 3-6.
5. Sysoiev, V.K., Vyatlev, P.A. Processing characteristics of laser thermo-splitting process // College Proceedings. Instrument Engineering. – 2008. – Vol., No.4. – pp. 48-50.

Рецензент д.т.н. И.Н. Шиганов



Предисловие

Машиностроение является базовой отраслью, определяющей экономическое развитие России. Конкурентоспособность изделий машиностроения в значительной мере определяется реализацией новых научных разработок на промышленных предприятиях нашей страны.

Публикуемая далее статья, убедительно показывает, что создание нового оборудования на Уралмашзаводе происходило при активном сотрудничестве инженерно-технического персонала предприятия с учеными различных советских вузов и академических институтов. Положительный опыт этой работы послужил поводом для опубликования данной статьи в журнале.

Главный редактор
д.т.н., проф. А.Г. Суслов

УДК 621.771, 681.51

DOI: 10.12737/article_5a313b6558b440.24460803

Б.Н. Поляков, д.т.н.

(Российский государственный профессионально-педагогический университет, 620012, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

E-mail: Bpoliakov@hotmail.com

Опыт внедрения САПР прокатного оборудования на Уралмашзаводе

Представлены хронология и последовательность работ более чем за 20-летний период по созданию пакетов различных компьютерных программ, которые сформировали фундамент будущей системы автоматизированного проектирования (САПР) технологий и прокатного оборудования на Уралмашзаводе. Даны описания наиболее эффективных пакетов компьютерных программ для решения задач оптимизации различных процессов деформации заготовок, параметров механизмов и их приводов, конструктивных параметров несущих деталей и сложных конструкций с позиций достижения прочности и долговечности.

Ключевые слова: САПР; Уралмашзавод; оптимизация; компьютерные программы; несущие детали; прочность.

B.N. Polyakov, D. Eng.

*(Russian State Professional-Pedagogical University,
11, Mashinostroiteley Str., Yekaterinburg, Sverdlov Region, 620012)*

Experience in CAD system introduction of rolling-mill machinery at Uralsmashzavod

A chronology and a sequence of works for more than 20 years in the development of different computer program packages which have formed a basis of a future CAD system of technologies and rolling-mill equipment at the enterprise of Uralsmashzavod are presented. The descriptions of the most efficient software packages are given to solve the optimization problems in different processes of blank deformation, parameters of mechanisms and their drives, design parameters of load-bearing parts and complex units from the point of view of strength and life obtaining.

Keywords: CAD system; Uralsmashzavod; optimization computer programs; structural components; durability.

За годы «перестройки» существенно понизился производственный потенциал отечественного машиностроения, в том числе и в равной мере, это относится и ко многим предприятиям тяжёлого машиностроения. Например, сегодняшний уровень производственных возможностей Уралмашзавода несоизмеримо и резко контрастирует с достославным периодом 50-70-х гг. прошедшего столетия – временем максимальной активности трудового коллектива и, в частности, конструкторских подразделений завода.

Отмеченные годы – это «золотой век», ренессанс конструкторской, научной и производственной деятельности Уралмашзавода – авторитетнейшего, знаменитого и уникального предприятия отечественного тяжёлого машиностроения. В этот замечательный период были созданы самые высокопроизводительные и впервые в мире автоматизированные блюминги 1300 (1964 г.), построена в цехе № 36 Уралмашзавода опытно-промышленная установка непрерывной разливки стали (УНРС) радиального типа (1964 г.), а в дальнейшем введена в эксплуатацию УНРС криволинейного типа (1968 г.) на Нижне-Тагильском меткомбинате (НТМК), были созданы проекты и построены термоотделения для закалки рельсов на НТМК (1968 г.) и на Кузнецком меткомбинате (1978 г.), создан первый отечественный автоматизированный универсально-балочный стан на НТМК (1977 г.), разработан эффективный проект унификации оборудования всех обжимных станков Союза и осуществлена реконструкция многих из них, а также выполнено много других оригинальных конструкторских разработок станков холодной прокатки, прессового, горного и бурового оборудования.

Именно в этот замечательный период интересных и увлекательных конструкторских работ были сделаны первые, весьма скромные шаги в применении электронно-цифровых вычислительных машин (ЭВМ или ЭЦВМ), в частности, для решения математических задач, возникающих в процессе проектирования прокатного оборудования, которые (шаги) постепенно, в своей совокупности, сформировали крепкую основу для создания будущей системы автоматизированного проектирования (САПР).

Прежде всего, необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. Мы – будущие инженеры-механики – студенты 1950-х гг., проходя «свои университеты», не изучали самостоятельных (среди основных дисциплин) или специальных курсов ни по вычислительной технике, ни по программированию. И, естественно, имели лишь поверхностные представления об этих научных новациях. К этому времени имелась только книга Н. Винера «Кибернетика и общество», которая серьёзно заставляла задуматься об автоматизации проектирования.

Кроме того, в это время были математики и

одни из первых программистов Свердловского отделения Математического института им. В.А.Стеклова АН СССР (сейчас Институт математики и механики УрО РАН Екатеринбург), которые в определённой мере оказали влияние на проектировщиков-конструкторов. Первым настольным пособием по программированию становится книга авторов А.И. Китова и Н.А. Криницкого «Электронные цифровые машины и программирование».

Эволюционный процесс накопления практического опыта в работе с ЭВМ естественно формировался по индуктивному методу: от простых задач – к более сложным. Первая «встреча» с ЭВМ «Урал-1» у нас состоялась в 1962 г. на предмет решения трансцендентного алгебраического уравнения. В дальнейшем «Урал-1» применяли для решения систем нелинейных уравнений невысокого порядка и аппроксимации различных экспериментальных данных, используя методы, замечательно и просто изложенные в книге А. Н. Крылова – «Лекции о приближенных вычислениях».

На Уралмашзаводе первым вычислительным центром (ВЦ) был большой зал, плотно заполненный однотипными шкафами, образующими ЭВМ «Урал-1», постоянный раздражающий гул и шум АЦПУ (устройств ввода и вывода информации) и громадные электронные лампы, которые в упаковке носили на своих плечах электронщики.

Создание проекта архитектуры будущей системы САПР, конечно, не предполагалось и не планировалось. Да и слово – «САПР» было для нас неизвестным. И разговоров о такой системе не было и не могло быть в те времена. Всё начиналось с конкретных расчётных конструкторских работ с применением ЭВМ, ведь мы были в составе огромного завода и «фантазиями и прожектками» не занимались. В общем, мы не были архитекторами будущей компьютерной системы и никакого проекта не разрабатывалось.

Главная цель начала работ по применению ЭВМ при проектировании заключалась в повышении качества проектных решений, как в области применяемых технологий, так и в реализующих их конструкциях, так как ЭВМ позволяет применять в расчётных методиках (математических моделях) современные и более сложные аналитические и численные методы (нереализуемых при ручных расчётах), обеспечивающие повышенную точность, достоверность и информативность расчётов, а значит – и собственно качество проектируемого оборудования. При этом использование ЭВМ позволяет минимизировать объём расчётных работ, выполняемых вручную, а в дальнейшем полностью их исключить.

Так объективно сложилось, что дальнейшее наше освоение ЭВМ и программирования было вызвано также необходимостью выполнения абсолютно новых для нас экспериментальных научно-исследовательских работ, связанных с освоением и совершенствованием

систем автоматизации спроектированного и изготовленного Уралмашзаводом самого высокопроизводительного в мире блюминга 1300 завода «Криворожсталь» и, особенно, с созданием систем с Управляющими вычислительными машинами (УВМ). Но в преддверии начала этих практических работ (1964 г.) по-счастливо близко познакомиться с современными математическими основами теории оптимального управления.

В начале 1960-х гг. появилась возможность ознакомиться с рядом монографий отечественных и зарубежных математиков (акад. Л.С.Понрягин, открывший в 1956 г. всемирно известный «принцип максимума», и американский математик Dr. R. Bellman, опубликовавший в 1957 г. свои работы по методу «динамического программирования», посвящённых математической теории оптимальных процессов. В это же время в г. Москве прошёл международный математический конгресс (где присутствовал Dr. R. Bellman), отдельная секция которого была посвящена математическим проблемам оптимизации систем.

Исследования по теории оптимального управления, естественно, были инициированы и, в первую очередь, отвечали интересам разработчиков ракетно-космических комплексов и атомной энергетики. Эти работы становятся весьма «модными» и достаточно часто начали появляться публикации по решению прикладных инженерных задач (но, главным образом, экономических) с использованием различных методов оптимизации (в основном – линейного программирования) и даже появились научно-популярные издания, например, брошюры проф. Е.С.Вентцель.

Автор статьи по отношению к этим методам также не безгрешен. Началу наших работ по оптимизации способствовали знакомство (а в дальнейшем и сотрудничество) и влияние учёного В.А.Святославского (в тот период – заведующего отделом ВНИИЭлектропривод, г. Москва), под руководством которого проводились совместные работы по созданию алгоритмов систем управления механизмами блюминга с помощью УВМ.

Совместно с математиком – программистом Ю.Д.Макаровым были теоретически решены и на ЭВМ получены численные результаты ряда задач, связанных с оптимизацией режимов управления электроприводами прокатного оборудования. Например, на основе принципа максимума были решены задачи по поиску оптимальных по быстродействию¹ переходных процессов и режимов управления в безынерционном электроприводе постоянно-

¹ Принимаемые критерии оптимальности в этих и последующих задачах – максимальное быстродействие или минимальный (заданный) нагрев двигателя соответствовали принятой в то время главной цели экономической политики – максимальной производительность любых технологических процессов, машин и агрегатов

го тока при постоянном или переменном моменте статических сопротивлений, а также в инерционной электромеханической системе с учётом упругости, и ряд других практических задач важных для проектирования и эксплуатации [1].

Эти решения частных задач оптимального управления затем вошли составным элементом в последующие решения крупных проблем по оптимизации технологических параметров и режимов управления на реверсивных и непрерывных станах горячей прокатки сортовых и листовых заготовок [1]. Вообще, поиск оптимальных решений (т.е. применение современных строгих математических методов) – это естественная инженерная черта, получил отражение почти на всех последующих пакетах компьютерных программ (КП).

С 1962 г. начались (совместно с ВНИИ-Электроприводом) теоретические и экспериментальные работы, направленные на создание технологических основ алгоритмов управления, применительно к первой в отечественной металлургии системе комплексной автоматизации самого высокопроизводительного в мире блюминга 1300, в том числе, и для системы с УВМ «ВНИИЭМ-3».

Разработка систем автоматического управления и, особенно, создание впервые в отечественной металлургии системы с УВМ, выдвинули ряд новых, сложнейших в математическом отношении научных и серьёзных технических задач, абсолютно несвойственных инженерным и конструкторским кадрам существующей на Уралмашзаводе системы проектирования прокатного оборудования. Но поскольку задачи касались технологий и их реализующего оборудования, изготовляемого Уралмашзаводом, мы «ничтоже сумняшеся» (ибо были не в состоянии адекватно оценить всю глубину трудностей и сложностей стоящих задач) смело приступили к их решению. Руководством была одобрена эта инициатива.

После пуска блюминга в эксплуатацию (октябрь 1964 г.) первая задача, поставленная перед ИТР, состояла в том, чтобы параллельно проведению экспериментальных работ связанных с автоматизацией, всеми научными методами способствовать скорейшему достижению проектной производительности. То есть вышеуказанные задачи и многие другие требовали полной и достоверной информации в реальном масштабе времени.

Была предложена структурная схема информационной системы на основе двух УВМ «ВНИИЭМ-3» – средства получения представительных массивов точной и надёжной научной информации, требуемой для построения математической модели объекта автоматизации и разработки алгоритмов управления. Такая система была спроектирована организациями – участниками проекта, была смонтирована (1966г.) и являлась первой в отечественной металлургии информационной системой на основе вычислительной техники [2].

Первооснову математического обеспечения информационной системы образовали комплексы программ автоматизированного сбора, предварительной обработки и накопления информации и программ по математической статистике на уровне теории случайных величин и случайных процессов. Разработка алгоритмов и программ (совместно с ВЦ Уралмашзавода, применительно в ЭВМ «Урал-4») по математической статистике была закончена в 1968 г. в объёме следующих программ: статистического анализа; одно- и двухфакторного дисперсионного анализа; двумерного и многомерного линейного и криволинейного (на основе метода Д.В. Вранон) регрессионного анализа, а также выбора шага квантования по времени, вычисления корреляционной функции и спектральной плотности мощности и других параметров марковских стационарных эргодических случайных процессов [3].

Созданный комплекс алгоритмов и программ был *вторым* пакетом программ по математической статистике, созданным в Советском Союзе, тогда как *первый* пакет был впервые разработан в Ленинградском институте Арктики и Антарктики (ЛИАА НИИ) [3]. Комплекс этих программ в течение почти 30-ти лет последовательно переводился в ВЦ Уралмашзавода на системы команд ЭВМ: Минск-2, Минск-22, ЕС – 1020 (и 1060) и, наконец, на персональный компьютер «ЭВМ», что дополнительно подтверждает корректность математических постановок, высокую устойчивость, надёжность, работоспособность и широкие прикладные возможности созданных алгоритмов.

Программы по статистике и другие статистические методы [1] применялись для обработки и анализа экспериментальной информации при решении многообразных задач автоматизации, при исследованиях процесса прокатки на блюминге 1300, механо- и электрооборудования и систем их регулирования, при создании ряда автоматических систем программного управления динамически нагруженными механизмами (первые прообразы *мехатроники*).

Пожалуй, впервые в прокатном производстве, да и в отечественной металлургии, так широко и разносторонне были применены статистические методы. Созданные программы в течение трёх десятилетий (до появления зарубежных разработок) были популярны и во всех научных и конструкторских подразделениях Уралмашзавода и широко применялись при проведении многочисленных экспериментальных работ, для создания методик расчёта процессов и машин и даже для решения ряда серьёзных производственных проблем.

Обширными комплексными статистическими исследованиями математически строго было доказано [2], что процесс прокатки на блюминге является нестационарным, стохастическим, многофакторным процессом, деформационные, энергосиловые, скоростные,

временные и динамические параметры которого представляют собой случайные величины, имеющие собственные, часто «ненормальные» функции распределения.

С позиции автоматизации, этот процесс обладает свойством дискретности, является неустойчивым (даже на высоком уровне производительности), с ограниченной наблюдаемостью, т.е. функционирует в условиях неполной информации, при этом влияние случайных возмущений на процесс прокатки существенно. Все выше отмеченные особенности были максимально возможно учтены при формировании математической модели, содержащей совокупность статистически достоверных уравнений регрессии с оценками точности и надёжности, для построения которой и максимизации целевых функций были применены принципы системного анализа и строгие методы математической теории оптимальных процессов.

На основе созданной модели был разработан пакет компьютерных программ (КП) для оптимальных распределений обжатий по пропускам (выбор схем и режимов прокатки) методом динамического программирования Р. Беллмана и максимальных скоростей (или ускорений), а также для обоснования параметров оборудования и приводов, который на протяжении более трёх десятилетий систематически применялся в расчётной практике при проектировании новых и реконструкции действующих реверсивных и непрерывных станов горячей прокатки.

Выполненные научные работы по оптимизации технологии прокатки обосновали целесообразность проведения некоторого совершенствования оборудования, реализация которого способствовало надёжному достижению высокой проектной производительности блюминга, а автоматическим системам, на уровне жёсткого программного управления, при высоком уровне организации производства, реально обеспечить годовую производительность в объёме 5,5...5,7 млн.т. по всаду.

Созданный пакет КП по оптимизации технологии и оборудования был успешно применён при разработке эффективного проекта «комплекса унифицированного механо – и электрооборудования участка рабочей клетки обжимных станов реализация которого обеспечило значительное сокращение сроков проектных работ, снижение себестоимости изготовления, а также сформировало резерв повышения производительности обжимных станов.

В связи с автоматизацией блюминга было также создано несколько сопутствующих КП по расчёту и оптимизации кольцевых схем транспортировки заготовок и проката, по оптимизации рычажных механизмов, ведомое (исполнительное) звено которых должно воспроизводить требуемую форму траектории или обладать определённой линейной скоростью при заданном перемещении и ряд других разработок, направленных на повышение ка-

чества и культуры проектирования и эксплуатации.

Итак, работы по автоматизации блюминга 1300 заложили первый и весьма солидный «краеугольный камень» в фундамент будущей САПР, и явились успешным началом по формированию этой системы.

Одна из важнейших, но сложных задач стоящих перед любым конструктором заключается в обеспечении прочности деталей и надёжности проектируемой машины. И, несомненно, в этом направлении применение ЭВМ и современных численных математических методов, обеспечивающих дифференциальную картину напряжённости в любых сечениях детали и их точках, является актуальной и весьма прагматичной задачей.

С целью повышения статической несущей способности тяжело нагруженных деталей и их конструкций сложных конфигураций и их термостойкости, при работе в условиях интенсивных, нестационарных тепловых воздействий, их оптимизации и построения параметрических рядов и, в конечном итоге, для повышения надёжности проектируемого оборудования, нами в середине 1970-х гг. совместно с Пермским политехническим институтом, были разработаны математические постановки и пакеты КП для решения на ЭВМ краевых задач теории упругости в перемещениях, в плоской и объёмной постановках, методом конечных элементов (МКЭ) для исследований напряжённно-деформированных (НДС) и термоупругих состояний (ТУС) областей сложных геометрических форм. Следует отметить, что первые КП, реализующие МКЭ, появились, если довериться Интернету, в середине 1970-х гг. в США (разработки NASA).

Работоспособность, достоверность и эффективность КП доказана на тестовых примерах и сравнением результатов расчётов с экспериментальными исследованиями, а также более двухдесятилетним периодом выполнения многочисленных расчётов при проектировании прокатного, горного, бурового и другого металлургического оборудования [1]. Все пакеты программ переданы и зарегистрированы в ГОСФАП СССР [1].

Кроме того, для оформления результатов исследований НДС и ТУС (в том числе и статистических) было разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять на графопостроителе «BENSON-2320» ВЦ Уралмашзавода различные виды рисунков, на которых показываются напряжённное и деформированное или термоупругое состояния и температурные поля всей конструкции или её фрагмента, а также построенная сетка КЭ и система граничных условий.

Созданные программы были успешно применены для исследования на ЭВМ НДС станин закрытого типа (также с целью анализа и обобщения опыта предшествующих поколений конструкторов в проектировании сложных фундаментных деталей) станов горячей и

холодной прокатки (в том числе с учётом концентраторов напряжений), универсальных шарниров с вкладышами скольжения, тяг различных конструктивных исполнений и многих других несущих деталей и сложных конструкций [1].

На основе результатов исследований НДС созданы унифицированные конструкции станин и построены параметрические ряды тяг и универсальных шарниров, впервые содержащие оценки нагрузочной способности каждого типоразмера, а для последних разработан и утверждён новый ГОСТ 8059–83.

Применение процедуры планирования численных экспериментов на ЭВМ (представляя модель детали в формате МКЭ) и многофакторного статистического анализа позволило получить эффективные для проектирования уравнения множественной регрессии с оценками точности и надёжности для зависимостей максимальных величин эквивалентных напряжений и перемещений (оптимизируемые параметры) как функции конструктивных параметров детали. Такие уравнения получены для станин заготовочных и листовых станов горячей и холодной прокатки, универсальных шарниров и тяг.

Были выполнены компьютерные исследования ТУС термонагруженных сложных конструкций прокатных цехов: слитковозов, линеек манипулятора, суппортов ножниц и ряда других деталей, на основе результатов которых созданы новые конструкции, успешно работающие в настоящее время [1].

Новые конструкторские решения для многих ответственных несущих деталей были разработаны благодаря многолетнему тесному творческому контакту с конструкторами Уралмашзавода. Высокая информативность результатов проявилась в исследованиях НДС деталей и конструкций четырёхвалковых листовых прокатных станов. Были исследованы НДС валковых систем станов «кварто» (с оценкой концентраторов напряжений в области галтелей рабочих и опорных валков), результаты которых позволили выполнить сравнение эффективности различных систем противозгиба.

Следующая достаточно интересная и сложная разработка оставила неприятные ощущения и воспоминания, вследствие ограниченности необходимой исходной экспериментальной информации, что в дальнейшем, при обсуждении результатов, вызвало много нервных, но безрезультатных споров. С целью получения оценок достоверности расчётов поперечной разнотолщинности и диапазона её изменения было проведено исследование взаимодействия рабочего и опорного валка с учётом сил трения скольжения рабочего валка вдоль образующей опорного. Отличительная особенность и новизна математической постановки задачи заключалась в применении МКЭ к решению контактной задачи теории упругости для тел сложной формы [1]. В результате

было доказано, что учёт сил трения даёт более достоверную величину разнотолщинности. А в дальнейшем появилась публикация, экспериментально подтвердившая наличие сил трения скольжения между рабочим и опорным валками в направлении их продольной оси применительно к станам горячей прокатки.

На основе созданных пакетов КП выполнено много других практических исследований с неизменным получением новых эффективных конструкторских и технологических решений [1].

Следует особо обратить внимание на следующий немаловажный и радующий факт: несмотря на то, что большинство типовых деталей оборудования прокатных станов проектировались на протяжении нескольких столетий отечественными и зарубежными конструкторами и, казалось бы, должны иметь оптимальные конструктивные параметры, применение современного математического аппарата – численных методов и ЭВМ, выявило ряд новых важных особенностей, реализация которых позволила достичь высокого уровня совершенства конструкций, в том числе и эстетического. И многолетняя практика применения созданных пакетов прикладных КП для проектирования широкой гаммы разнообразных деталей и конструкций сложных конфигураций действительно убедительно доказала реальность достижения прекрасного – красоты компьютерных конструкторских решений [1].

На основе решения ряда теоретических задач по оптимизации и опыта совершенствования режимов работы электроприводов механизмов блюминга 1300, в конце 1970-х гг., используя методы идентификации и регистрацию параметров электропривода (как исходной информации), впервые были созданы² КП для определения величины постоянной времени привода, махового и статического моментов (постоянных и переменных) для любых машин и механизмов прокатного оборудования и сформировалась математическая постановка для определения суммарного зазора (люфта) в механических системах и в зубчатых передачах. Эти разработки имеют большое значение для качественной наладки и совершенствования режимов функционирования электроприводов и динамики (т.е. срока службы) механооборудования.

В начале 1980-х гг., в связи с проведением теоретических и экспериментальных исследований процесса правки рельсов², с целью повышения качества технологии и конструкций правильных машин, совместно с Пермским политехническим институтом была создана современная научная методология исследования и оптимизации НДС профиля при прав-

² Между прочим, при проведении экспериментальных исследований процесса правки рельсов в производственных условиях НТМК впервые была применена телеметрическая система передачи сигналов, с установленными на движущихся рельсах тензодатчиков, на регистрирующую аппаратуру (В.И.Паутов, УПИ).

ке, основанная на решении МКЭ объёмной стационарной изотермической задачи упруго-пластичности, и разработана КП для расчёта дифференциальных и интегральных параметров процесса знакопеременного изгиба рельсов и других фасонных профилей.

Программа позволяет вычислить компоненты векторов перемещений, тензоров напряжений и деформаций и их распределение в любой точке подвергаемого правке профиля; распределение остаточных напряжений и величины конечной кривизны и многие другие параметры.

С помощью КП выполнены численные и параметрические исследования некоторых аспектов применяемых на НТМК технологий правки, в результате которых обоснован ряд технологических и конструктивных рекомендаций, в частности, предложен оптимальный режим правки термоупрочнённого рельса, уменьшающий конечную кривизну примерно в 25 раз и показана целесообразность автоматизации правильного комплекса – микропроцессорной программной системы.

В середине 1980-х гг., в связи с разработкой малоотходных и менее энергоёмких технологий производства заготовок и фасонных профилей, совмещаемых с машинами не прерывного литья, и реализуемых при реконструкции обжимно-заготовочных комплексов, созданы две очень информативные КП для исследований НДС обода железнодорожного колеса в процессе его осадки и НДС непрерывнолитого сляба при его прессовании в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Результаты применения этих программ способствовали более точному обоснованию технологических параметров и выбору конструктивных параметров оборудования.

Но не все работы были успешными. Были и неудачи. Например, была попытка построить комплекс КП для поиска оптимальных структур (кинематических схем) рычажных, а может быть и любых механизмов, базируясь на методах идентификации, при внешней нагрузке, задаваемой в форме статистических оценок по величине и времени (в частности, корреляционной функции).

Но попытка создать (1970-е гг.) программу для решения соответствующего интегрального уравнения с заданной точностью не «увенчалась успехом». Видимо, возможная причина заключалась в весьма ограниченных технических возможностях применяемой в то время ЭВМ «Минск-22». В этой научной работе и в ряде других, сугубо прикладных научных исследований, плодотворно контактировали с Уральским госуниверситетом с Уральским политехническим институтом (УПИ) (создан комплекс программ для расчётов плотности вероятности случайной долговечности, вероятности разрушения и ресурса деталей [1]).

Итак, вся совокупность выше приведённых компьютерных программ и многие другие компоненты [1], созданные в 70-е гг. прошед-

шего столетия, главным принципом разработки которых всегда были: корректная физическая и математическая постановка задачи и строгие математические методы реализации её решения на ЭВМ, являются представительным комплексом современных средств качественного проектирования технологий и оборудования прокатных станов и могли бы вполне сформировать надёжную основу эффективной САПР.

Следует особо отметить, что большинство работ и достижений по созданию САПР и внедрению их результатов в конструкторскую практику, с разработкой новых, более надёжных несущих деталей и сложных конструкций, выполнены благодаря тесному сотрудничеству с учеными вузов и академических институтов.

Автор выражает искреннюю признательность и сердечную благодарность разработчику алгоритмов и программ – инженеру - математику В.Я. Гольденбергу; конструкторам С.Н. Красносельскому, Ю.К. Панкратову, А.К. Филатову, Н.К. Корякину, Ю.П. Чистякову, А.И. Госькову, А.В. Гладкову, А.Н. Сулимову и многим другим коллегам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков, Б.Н. Повышение качества технологий, несущей способности конструкций, долговечности оборудования и эффективности автоматических систем прокатных станов. – СПб.: «Реноме», 2006. 528 с.
2. Статистический анализ и математическое моделирование блюминга / С.Л. Коцарь, Б.Н. Поляков, Ю.Д. Макаров, В.А. Чичигин. М.: Metallurgy, 1974. 280 с.
3. Поляков, Б.Н. Статистические методы в алгоритмах и примерах (из практики прокатного производства): учеб. пособ. – СПб.: «Реноме», 2007. 182 с.

REFERENCES

1. Polyakov, B.N. *Quality Increase in Technologies, Structure Load-carrying Capacity, Equipment Life and Efficiency of Rolling Mill Automated Systems*. – S-Pb.: “Renome”, 2006. pp. 528.
2. *Statistical Analysis and Blooming Mill Mathematical Modeling* / S.L. Kotsar, B.N. Polyakov, Yu.D. Makarov, V.A. Chichigin. M.: Metallurgy, 1974. pp. 280.
3. Polyakov, B.N. *Statistical Methods in Algorithms and Examples (from practice of rolling-mill production): manual* – S-Pb.: “Renome”, 2007. pp. 182.

Рецензент д.т.н. В.А. Демин

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ ЗА 2017 г.

Технологии наукоёмких материалов и нанотехнологии

- Ворначева И.В., Гадалов В.Н., Макарова И.А., Филонович А.В. Внутреннее трение литого сплава с никель-хромовой матрицей после термической обработки..... № 10(76)-2017 г.
- Кочешков И.В. Имитационное моделирование структуры волокнистого композитного материала, получаемого с использованием разных типов листовых полуфабрикатов..... №1(67)-2017 г.
- Куликов И.В., Крылова Т.С., Черных М.Я., Черных И.А., Занавескин М.Л. Ступенчатый подъем температуры в процессе формирования сплошных эпитаксиальных пленок сверхпроводников YBa₂Cu₃O_{7-x} для повышения токонесущей способности ВТСП лент второго поколения..... №11(76)-2017 г.
- Левшин Г.Е. О движении расплава в индукторной тигельной печи..... №4(70)-2017 г.
- Макаров С.С., Дементьев В.Б. Численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 30ХГСН2А..... № 9(75)-2017 г.
- Монсеев А.А. Критериальная модель химической стабильности в статических условиях..... № 10(76)-2017 г.

Наукоёмкие технологии в заготовительном производстве

- Демин В.А. Проектирование инновационных технологий в обработке металлов давлением..... №8(74)-2017 г.
- Кузьмин С.В., Лысак В.И., Кузьмин Е.В. Применение ультразвука при сварке взрывом..... №7(73)-2017 г.
- Макаров С.С., Чекмышев К.Э. Экспериментальное исследование охлаждения высокотемпературной металлической заготовки из стали 40Х..... №12(78)-2017 г.
- Овчинников В.В. Технология сварки алюминиевого деформируемого сплава 1151..... №1(67)-2017 г.
- Овчинников В.В., Андреева Л.П., Любимова Т.Д. Оксидные включения в швах алюминиевых сплавов, полученных методом сварки трением с перемешиванием..... №6(72)-2017 г.
- Поветкин В.В., Букаева А.З., Хандожко А.В. Использование бензовоздушных горелок для добычи и обработки блочного камня..... №12(78) - 2017 г.
- Рахмьянов Х.М., Рахмьянов А.Х. Влияние кинематической вязкости расплава материалов на качество обработки при тонкоструйной плазменной резке биметаллических композиций..... №5(71)-2017 г.

Наукоёмкие технологии механической обработки заготовок

- Безязычный В.Ф., Басков М.В. Расчётное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей..... №7(73)-2017 г.
- Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием..... №8(74)-2017 г.
- Братан С.М., Богущий В.Б., Новоселов Ю.К., Роцупкин С.И. Моделирование процесса стохастического взаимодействия инструмента и заготовки на операциях шлифования..... №5(71)-2017 г.
- Городец И.А., Михайлов А.Н., Голубов Н.В. Повышение качества шлифования заготовок из камня..... №5(71)-2017 г.
- Денисенко А.Ф. Динамические характеристики токарного станка среднего типоразмера, установленного на резинотехнологических виброизолирующих опорах..... №5(71)-2017 г.
- Зеровщиков А.Е., Артемов И.И., Самохин Н.В. Научный подход к обеспечению точности державок токарного инструмента со сменными неперетачиваемыми пластинами..... №4(70)-2017 г.
- Карпачев А.Ю. Наукоёмкая технология вальцевания пыльных дисков сферическими роликами..... №1(67)-2017 г.
- Клепиков В.В., Черепанин А.А. Особенности облегчающего шевингования цилиндрических зубчатых колес..... №6(72)-2017 г.
- Мелентьев В.В., Маслеников Е.И., Порошин К.Г., Шибанов О.В. Наукоёмкий датчик для вибродиагностики на базе технологии МЭМС и RFID..... №6(72)-2017 г.

- Морозов А.В., Гусев В.Г. Моделирование напряженного состояния режущей поверхности дискретного шлифовального круга. № 10(76)-2017 г.
- Морозов А.В., Гусев В.Г. Моделирование температуры заготовки, шлифуемой торцовым сплошным и сегментным кругами, в САЕ-комплексе Solid Works. №11(76)-2017 г.
- Михайлов А.Н., Ивченко Т.Г., Петряева И.А. Многокритериальная оптимизация режимов резания при чистовом точении фасонных поверхностей в условиях переменности действующих ограничений. №3(69)-2017 г.
- Носенко В.А., Фетисов А.В., С.В. Носенко, Харламов В.О. Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроабразивной тупоплазменной обработке металлов. № 10(76)-2017 г.
- Пашков Е.В., Вожжов А.А. Моделирование процесса двурезцового точения фасонных поверхностей. №6(72)-2017 г.
- Полетаев В.А., Цветков Е.В. Качество поверхностного слоя лопаток компрессоров из титана при многокоординатном глубинном шлифовании. №12(78) - 2017 г.
- Сергеев А.С., Тихонова Ж.С., Уварова Т.В. Повышение точности расчета составляющих силы резания при точении коррозионностойких сталей. № 9(75)-2017 г.
- Ямников А.С., Волков Д.П. Влияние угла профиля передней поверхности резца на степень деформации сдвига. №6(72)-2017 г.
- Научноёмкие технологии электро-физико-химической и комбинированной обработки**
- Архипов П.В., Янюшкин А.С., Медведева О.И., Попов В.Ю. Повышение эффективности комбинированного электрохимического шлифования твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке. №2(68)-2017 г.
- Балановский А.Е., Ву Ван Гюи Технологическое повышение качества поверхности деталей с плазменной цементацией. №3(69)-2017 г.
- Бабичев А.П., Мотренко П.Д. Инновационные технологии виброволновой обработки деталей машиностроения и вертолетостроения. №8(74)-2017 г.
- Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Технологии улучшения поверхностных свойств геометрически сложных изделий воздействием низкотемпературной плазмы. №8(74)-2017 г.
- Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Технологические особенности формирования нанокompозитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы. №3(69)-2017 г.
- Груздев А.А., Моргунюв Ю.А., Саушкин Б.П. Особенности электроэрозионной обработки разрядными импульсами малых энергий. № 9(75)-2017 г.
- Гусев В.Г., Морозов А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей. № 9(75)-2017 г.
- Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей. №8(74)-2017 г.
- Королев А.В., Балаев А.Ф., Балтаев А.С. Технология ультразвуковой стабилизации геометрических параметров упругих пластин. №2(68)-2017 г.
- Моргунюв Ю.А. Научнометрический анализ развития наукоёмких технологий физико-химической обработки. № 10(76)-2017 г.
- Неверов А.Н. О возможности реализации режима слабой кавитации при ультразвуковой очистке РЭА. №2(68)-2017 г.
- Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Наукоёмкая технология очистки рабочих поверхностей деталей машин от загрязнений. №1(67)-2017 г.
- Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Инновационные технологические процессы с использованием ультразвука. №7(73)-2017 г.
- Рахмиев Х.М., Васильевская С.И. Выбор электролитов для электрохимической обработки отверстий малого диаметра в меди. №4(70)-2017 г.
- Сарсенгалиев А.М., Бекренёв Н.В. Наукоёмкая технология с использованием ультразвука при очистке труднодоступных поверхностей деталей сложной формы. №12(78)-2017 г.
- Смоленцев В.П. Инновационные технологии комбинированных методов обработки. №7(73)-2017 г.
- Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В. Технология комбинированного эрозионно-лучевого нанесения покрытий. № 9(75)-2017 г.
- Федонин О.Н., Сьянов С.Ю., Папикян А.М. Обеспечение износостойкости и усталостной прочности поверхностей при электроэрозионной обработке. №11(76)-2017 г.
- Научноёмкие технологии отделочно-упрочняющей обработки заготовок**
- Бабичев А.П., Вобу А.М., Пастухов Ф.А., Вейсса Г.К. Повышение интенсивности съема металла при вибрационной обработке на основе использования «щелевого» эффекта в рабочей камере. № 9(75)-2017 г.
- Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Лисицкий Л.О., Ширин А.А., Ерина Т.С., Семиниченко К.В. Экспериментальное исследование виброволновой обработки пакета образцов из разнородных материалов, при различной ориентации (расположении) в пакете. №11(76)-2017 г.
- Берберов С.А., Лебедев В.А. Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях. № 9(75)-2017 г.
- Зайдес С.А., Нго Као Кыонг Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. №3(69)-2017 г.
- Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитками. №5(71)-2017 г.
- Королев А.В., Балаев А.Ф., Яковишин А.С. Технология снятия остаточных напряжений при многоциклового обкатке колец подшипников. №1(67)-2017 г.
- Лебедев В.А., Серга Г.В., Чаава М.М., Дёмин Г.В. Компонентные схемы малогабаритных роторно-винтовых вибрационных технологических систем для отделочно-упрочняющей обработки деталей. №10(76)-2017 г.
- Функционально-ориентированные и модульные технологии**
- Базров Б.М. Анализ классификаций изделий машиностроения. №7(73)-2017 г.
- Бутенко В.И., Дуров Д.С., Шаповалов Р.Г. Особенности формирования и поведения функциональных полислоев на поверхностях деталей трибосистем. №11(76)-2017 г.
- Лагутин С.А., Сандлер А.И. Построение функционально-ориентированной технологии второго порядка при обработке зубчатых колес. №2(68)-2017 г.
- Макаров В.Ф., Никитин С.П., Песин М.В., Горбунов А.С. Влияние локальных технологических концентраторов напряжений на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. №5(71)-2017 г.
- Макаров В.Ф. Разработка и применение новых инновационных технологий при производстве современных газотурбинных двигателей. №7(73)-2017 г.
- Михайлов А.Н., Костенко А.В. Особенности обеспечения функционально-ориентированных технологий изготовления деталей судовых дизелей. №4(70)-2017 г.

Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Байков А.В. Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного.....№9(75)-2017 г.

Сандлер А.И., Лагутин С.А., Гудов Е.А. Модульные и функционально-ориентированные технологии в проектировании и производстве червячных передач.....№3(69)-2017 г.

Ситников А.А., Собачкин А.В., Яковлев В.И., Логинова М.В., Свиридов А.П. Особенности структурного состояния механокомпозитов на основе алюминия для газодетонационного напыления покрытий.....№12(78)-2017 г.

Смоленцев В.П., Сафонов С.В. Способы и технологии модификации поверхностного слоя металлических изделий.....№2(68)-2017 г.

Сулов А.Г., Шалыгин М.Г. Научно-техническая технология повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородных средах.....№2(68)-2017 г.

Сулов А.Г. Конструкторско-технологическое обеспечение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения.....№7(73)-2017 г.

Шоев А.Н. Технологическое повышение долговечности кулачков распределительных валов автотракторных двигателей.....№11(76)-2017 г.

Шоев А.Н. Эффективные технологии повышения долговечности коленчатых и распределительных валов автотракторных двигателей.....№12(78)-2017 г.

Научно-технические технологии изготовления деталей из неметаллических материалов

Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Влияние режимов резания на выходные параметры процесса при обработке поликристаллических композиционных материалов.....№6(72)-2017 г.

Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов в машиностроении.....№8(74)-2017 г.

Котов С.А. Научно-техническая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков импульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера.....№1(67)-2017 г.

Марков А.М., Макарова Н.А., Гайст С.В. Износ инструмента при фрезеровании стеклопластика.....№4(70)-2017 г.

Технологии прототипирования и лазерной обработки

Богданов А.В., Соколов В.И., Шмелев С.А. Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки железнодорожных колес.....№10(76)-2017 г.

Григорьянц А.Г. Сравнительный анализ параметров импульсного лазера на парах меди с известными типами технологических лазеров.....№1(67)-2017 г.

Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Казарян М.А., Лябин Н.А. Возможности прецизионной микрообработки материалов импульсным излучением лазера на парах меди.....№2(68)-2017 г.

Котов С.А., Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Инфимовский Ю.Ю., Блинков В.В. Научно-техническая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера.....№11(76)-2017 г.

Курынец С.В., Шиганов И.Н., Исхаков Ф.Р., Гильмутдинов А.Х. Контроль параметров ванны расплава при лазерной сварке с использованием скоростной видеокамеры.....№3(69)-2017 г.

Малов И.Е. Исследование применимости технологии лазерного управляемого термораскалывания для изготовления элементов термооптического покрытия радиаторов космических аппаратов.....№12(78)-2017 г.

Шиганов И.Н., Шамов Е.М., Бегунов И.А., Шелестова А.К. Лазерная сварка стали 09Г2С по слою флюса.....№0(76)-2017 г.

Якимова М.А., Алехнович В.И., Григорьянц А.Г. Рефрактометр НПВО для исследования рассеивающих веществ.....№5(71)-2017 г.

Якимова М.А., Мельников Д.М., Садков А.Б., Григорьянц А.Г. Фотоакустическая гомогенизация вещества для оптических измерений.....№6(72)-2017 г.

Научно-технические технологии при сборке машин

Колобовникова Д.И., Майданюк Е.П., Петровский Э.А. Автоматизация процесса центровки двигателя насосной установки.....№6(72)-2017 г.

Чудин В.Н. Научно-техническая технология соединения давлением листовых деталей.....№3(69)-2017 г.

Автоматизированная подготовка и управление технологическими процессами

Витязь П.А., Хейфец М.Л., Чижик С.А. Состояние и перспективы развития технологических комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов.....№7(73)-2017 г.

Ингеманссон А.Р. Разработка состава и механизмов функционирования информационно-исполнительных киберфизических систем в механообрабатывающем производстве.....№11(76)-2017 г.

Сулов А.Г., Петрешин Д.И., Федонин О.Н., Хандожко В.А. Автоматизированная технологическая система обеспечения контактной жесткости деталей машин.....№8(74)-2017 г.

Хейфец М.Л. От аддитивного производства к самовоспроизведению машин, их узлов и деталей.....№4(70)-2017 г.

Решение IX МНТК «Инновационные технологии в машиностроении: от проектирования к производству конкурентоспособной продукции (ТМ-2017)», Волгоград, 19 - 22 сентября 2017 г.....№11(76)-2017 г.

Указатель статей за 2017 г.....№12(78)-2017 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 03.11.2017. Выход в свет 29.12.2017.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16