

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 10 (64)

2016

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Шалыгин М.Г. Научно-технологическая технология уменьшения водородного изнашивания рабочих поверхностей трения 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Рахмиянов Х.М., Леонтьев И.А., Василевская С.И. Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра 7

ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мельников Д.М., Якимова М.А. Технологические основы определения степени изменения кинематической вязкости жидкой среды методом лазерного фазового анализа 14

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Федонин О.Н., Хандожко А.В., Щербаков А.Н., Захаров Л.А., Польский Е.А. Проектирование металлорежущих станков с использованием унифицированных изделий 20

Братан С.М., Богущий В.Б., Колесов А.Г. Математическое моделирование процесса доводки прецизионных поверхностей упругих пластин с поверхностно-активными веществами 26

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Богданов А.В., Голубенко Ю.В., Тюльпанова Е.М. Особенности лазерной резки полимеров 33

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Польский Е.А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей 39

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-технологические 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.

Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

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)

чл.-кор. 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.т.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. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

Редактор

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

ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 10 (64)
2016

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.

Chairman of Editorial Committee
m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M.

Chairman Assistant
d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G.

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)

m.-corr. 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.en.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. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

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 10.07.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE MATERIALS PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

Shalygin M.G. High technology to reduce hydrogen wear of work surfaces of friction 3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Rakhimyanov Kh. M., Leontiev I.A., Vasilevskaya S.I. Technological prospects in combination of electro-erosion and electro-chemical processes in pinholes working 7

TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND LASER PROCESSING

Grigoriyants A.G., Shiganov I.N., Melnikov D.M., Yakimova M.A. Technological fundamentals for definition of changes in liquid medium kinematic viscosity by method of phase analysis 14

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Fedonin O.N., Khandozhko A.V., Shcherbakov A.N., Zakharov L.A., Polsky E.A. Machine-tool design using common parts 20

Bratan S.M., Bogutsky V.B., Kolesov A.G. Mathematical modeling of high-precision surfaces finishing in elastic plates with surface-active matters 26

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF NONMETALLIC PARTS PRODUCTION

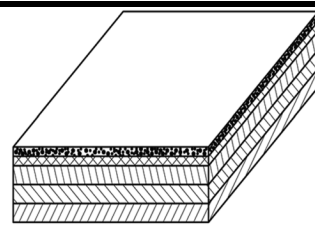
Bogdanov A.V., Golubenko Yu.V., Tyulpanova E.M. Peculiarities in polymer laser cutting 33

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Polsky E.A. Technological support of accuracy and quality of machinery surfaces at designing of route-operation engineering process by synthesis method based on dimensions ties analysis 39

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»



УДК 621.7.016.623
DOI: 10.12737/21421

М.Г. Шалыгин, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7),
E-mail: migshalygin@yandex.ru

Наукоёмкая технология уменьшения водородного изнашивания рабочих поверхностей трения

Рассмотрены проблемы снижения водородного изнашивания стальных деталей, работающих в водородной среде и, в частности, в углеводородных жидкостях. Представлены свойства и некоторые параметры качества поверхности стали после термической обработки, высоковакуумного отжига и ионной имплантации. Проведен анализ образовавшихся свойств поверхности на концентрацию водорода в поверхностном слое и интенсивность водородного изнашивания.

Ключевые слова: термическая обработка; высоковакуумный отжиг; ионная имплантация; водородное изнашивание; качество поверхности.

M.G. Shalygin, Can.Eng.
(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk 241035)

High technology to reduce hydrogen wear of work surfaces of friction

This paper reports the problems considered regarding the hydrogen wear decrease in steel parts operating in hydrogen medium and, in particular, in hydrocarbon liquids. The comparative researches are carried out with samples after thermal treatment, high-vacuum annealing and ionic implantation and also after a combination of these methods. The structure of samples surface layer is investigated after a combined working and the values of micro-hardness of layers formed are given. The investigation of surface quality changes is carried out. The results of comparative abrasion tests of samples are presented. It is defined that after a combined working samples wear decreased. There are shown data on the hydrogen concentration in a surface layer of samples and the analysis of surface properties for hydrogen concentration and hydrogen wear intensity is carried out.

Keywords: thermal treatment; high vacuum annealing; ionic implantation; hydrogen wear; surface quality.

Проблема водородного изнашивания особо остро стоит в узлах трения, работающих в углеводородных средах. В настоящее время не существует универсальной технологии, позволяющей полностью исключить проникновение атомарного водорода из водородной среды в поверхностный слой металла.

Наибольшее распространение среди средств повышения водородной стойкости получило применение высокопрочных чугунов с графитосодержащей структурой. Графит сфероидальной формы имеет относительно небольшое отношение поверхности к объёму, что определяет наибольшую сплошность металлической основы.

Благодаря высокому содержанию углерода и сложной структуре кристаллической решетки такие чугуны обладают высокой износостойкостью в условиях водородного изнашивания. Однако во многих узлах, где чугун по своим механическим свойствам не может применяться, используют детали, изготовленные из сталей [1].

В частности, при производстве битумных шестеренных насосов из сталей различных марок изготавливают такие детали как шестерни, вставки и др. Одним из элементов, которые в большей степени подвержены водородному изнашиванию являются зубья шестерен [2]. В связи со сложным профилем зубьев их

поверхностное упрочнение носит весьма затруднительный характер. Это обусловлено тем, что качество поверхности зуба должно соответствовать требованиям нормативных документов.

Незначительные отклонения в профиле зуба или качестве его поверхности приводит к вибрациям и шумам при эксплуатации. Так, в частности, на некоторых промышленных предприятиях используются насосы, шестерни которых изготовлены из сталей марок 45, 40Х, 60Г.

Водородное изнашивание стальных шестерен, при перекачивании битумных мастик и эмульсий является основной причиной выхода из строя насосов и остановки линии подачи битума. Поэтому повышение водородной стойкости зубьев стальных шестерен, работающих в условиях водородной среды, без изменения качества поверхности и профиля зуба, имеет научно-практическое значение.

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования повышения водородной стойкости стальных деталей совокупностью методов термической обработки, высоковакуумного отжига и ионной имплантации кремнием. Образцы изготовлены из стали 45 и закалены до фактической твердости 40,5...44,0 HRC. Ионная имплантация проводилась на установке «Везувий 3-М». Режимы высоковакуумного отжига и имплантации ионов кремния приведены в работе [3]. Порошкообразный кремний был получен лабораторным путем прокаливанием с магнием диоксида кремния.

Для исследования поверхностного слоя было проведено травление торца образца, подверженного ионной имплантации, 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. На рис. 1 в поверхностном слое присут-

ствуют светлые полосы. Цвет полос неоднороден, на них встречаются тонкие включения более темного цвета. Полосы, большей частью, расположены параллельно относительно поверхности образца. При этом, чем ближе к поверхности образца, тем плотность данных полос возрастает. Это может говорить о присутствии в структуре стали слоев, насыщенных ионами кремния. Наибольшая глубина залегания полос 655...702 мкм. Ширина полос на наибольшей глубине залегания не превышает 47 мкм.

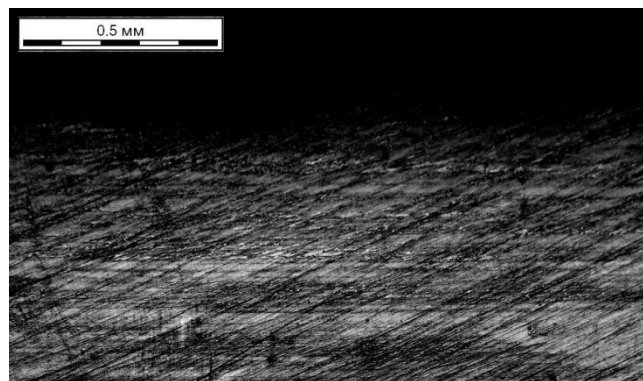


Рис. 1. Торце образца после ионной имплантации

Немаловажный интерес представляет исследование влияния таких полос на качество поверхностного слоя. В целом методика технологического обеспечения параметров качества поверхностного слоя приведена в работе [4]. Как известно, одной из основных характеристик качества поверхностного слоя является шероховатость. В этой связи были произведены измерения шероховатости поверхности до и после проведения технологических операций. В табл. 1 приведены параметры шероховатости образцов.

1. Параметры шероховатости образцов

Обработка	L_0 , мм	L_t , мм	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм	R_p , мкм	R_v , мкм	S_m , мм
ТО	0,8	4,8	0,040	0,45	0,56	0,16	0,29	0,05
ТО+ высоковакуумный отжиг		4,8	0,040	0,81	1,59	0,38	0,43	0,04
ТО+ высоковакуумный отжиг + имплантирование ионов кремния		2,4	0,045	0,29	0,49	0,13	0,35	0,02
<i>Примечание.</i> L_0 – базовая длина; L_t – длина трассирования.								

В целом можно говорить о незначительном изменении качества поверхности. Параметр Ra изменился незначительно, при этом следует обратить внимание на уменьшение параметра Sm при проведении ионной имплантации в 2,5 раза по сравнению с термически обработанным образцом и в 2 раза по сравнению с образцом после высоковакуумного отжига. Такие результаты говорят о том, что при проведении данных технологических операций требуемое качество поверхностного слоя не ухудшается, следовательно, последующей механической обработки не потребуются.

Для исследования физико-механических свойств поверхностного слоя были проведены измерения микротвердости полос методом восстановленного отпечатка. Измерения проводили по методу Виккерса на приборе TMB 1000. Микротвердость полос при этом составила $H_{\square} = 56,76$, что приблизительно соответствует твердости по Роквеллу 50 HRC. При этом остальная структура материала имела микротвердость $H_{\square} = 45,37$, что приблизительно соответствует твердости по Роквеллу 44 HRC.

Для проверки эксплуатационных характеристик образцов были проведены испытания на износ. В качестве контртела был взят индентор из термически обработанной стали 45 с твердостью 44,7...44,9 HRC. Нагрузка составила 50 Н. В процессе испытаний измеряли износ по массе каждые 1000 м пути трения. Испытания проводились на машине трения в присутствии смазочного материала, в качестве которого выступало индустриальное масло И-40А. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2.

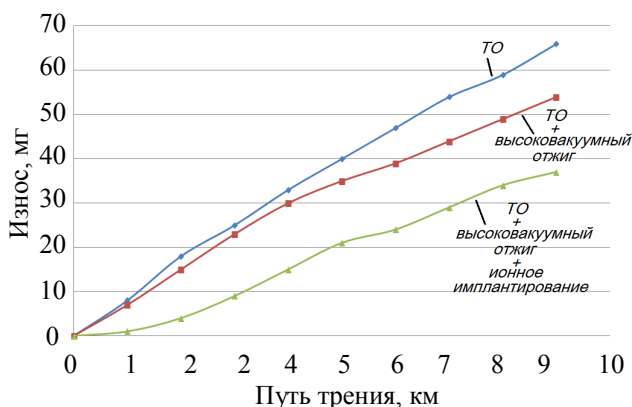


Рис. 2. Результаты сравнительных испытаний на износ

Из рисунка видно, что потеря массы образца после имплантирования ионов кремния почти в 1,8 раза меньше, чем у

образца после термической обработки и в 1,5 раза меньше, чем после высоковакуумного отжига. Следовательно, срок службы поверхностей трения деталей из сталей, которые насыщены ионами кремния, в условиях углеводородной среды, больше по сравнению с поверхностями деталей из сталей, используемыми в промышленности при перекачивании углеводородов.

Одной из причин эффективности совокупности предложенных технологических операций может являться то, что при высоковакуумном отжиге в поверхностном слое образца снижается количество биографического водорода. В то же время при ионной имплантации поверхностный слой насыщается ионами кремния, часть которых может образовать карбиды в поверхностном слое, что косвенно подтверждают полосы на рис. 1. Часть ионов может заполнить собой дефекты кристаллической решетки, такие как вакансии и дислокации, что может являться причиной уменьшения параметра шага шероховатости по средней линии Sm (см. табл. 1). Часть ионов может оседать в междоузлиях решетки, создавая твердый раствор внедрения.

Все это позволяет помешать интенсивному проникновению в поверхностный слой атомарного водорода, выделившегося из смазочного материала или углеводородной среды и, как следствие, уменьшить водородное охрупчивание и водородное изнашивание поверхностного слоя деталей.

Для проверки данной гипотезы было произведено измерение содержания водорода в образцах. Измерения проводились в потоке аргона на анализаторе водорода RHEN-602. Результаты измерений приведены в табл. 2.

2. Содержание водорода в образцах

Обработка	До испытаний, ppm	После испытаний, ppm
ТО	7,4	7,1
ТО+ высоковакуумный отжиг	6,3	7,3
ТО+ высоковакуумный отжиг + имплантирование ионов кремния	6,5	5,4

В результате измерений количества водорода установлено, что содержание биографического водорода в образцах после высоковакуумного отжига и ионной имплантации прак-

тически неизменно. Так, содержание водорода в этих образцах ниже, чем в образцах после термической обработки. Это говорит об эффективности метода высоковакуумного отжига для снижения концентрации биографического водорода в поверхностном слое.

В то же время согласно [1] после фрикционных испытаний при охлаждении образца наблюдается диффузионный процесс в сторону выравнивания концентрации водорода в поверхностном слое. Очевидно, что выравнивание концентрации водорода в поверхностном слое при проведенных авторами исследованиях происходит за счет биографического водорода.

Наряду с этим после испытаний на износ содержание водорода в образцах после ионной имплантации снизилось. В то же время в образцах после высоковакуумного отжига концентрация водорода увеличилась. Это может являться следствием того, что поверхностный слой насыщенный кремнием снижает диффузию водорода из смазывающего материала. Следовательно, можно прийти к заключению, что на повышение срока службы образцов, работающих в условиях углеводородной среды, биографический водород оказывает незначительное влияние по сравнению с водородом, выделившимся из среды.

Таким образом, установлено, что совокупность методов термической обработки, высоковакуумного отжига и ионной имплантации увеличивает износостойкость стальных деталей, снижает концентрацию водорода из смазывающего материала, при незначительном изменении качества поверхностного слоя.

Высоковокумный отжиг, как технологический метод уменьшения водородного изнашивания, эффективен для узлов сухого трения и малоэффективен при наличии водородной среды. В дальнейшем целесообразно рассмотреть влияние предложенной совокупности методов на субшероховатость поверхности.

В связи с тем, что субшероховатость поверхности коррелирует с зернистостью материала [5] и слабо коррелирует с видом механической обработки [6], такие исследования представляют интерес для определения

свойств образованных зерен и их влияния на свойства поверхности.

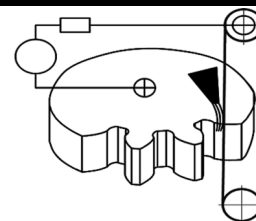
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Защита** от водородного износа в узлах трения / Колл. авт.; под. ред. А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 135 с.
2. **Шалыгин, М.Г.** Водородное и абразивное изнашивание поверхностей деталей насосов при перекачивании углеводородов // *Строительные и дорожные машины.* – 2014. – № 4. – С. 27-30.
3. **Шалыгин, М.Г.** Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2016. – № 7 (61). – С. 10–13.
4. **Суслов, А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
5. **Суслов, А.Г., Шалыгин, М.Г., Кузнецов, С.В.** Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2015. – № 9(51). – С. 45–47.
6. **Суслов, А.Г., Порошин, В.В., Шалыгин, М.Г., Кузнецов, С.В.** Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости поверхности деталей и зернистости материала) // *Научно-технические технологии в машиностроении.* – 2015. – № 11(53). – С. 3–7.

REFERENCES

1. *Hydrogen Wear Protection in Friction Units* / Group of authors; under the editorship of A.A. Polyakov – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 135.
2. Shalygin, M.G. Hydrogen wear and abrasion of surfaces in pump parts at hydrocarbon transfer // *Construction and Road Building Machines* – 2014. – № 4. – pp. 27-30.
3. Shalygin, M.G. Structure formation in surface layer of machinery by methods of high-vacuum annealing and ionic implantation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2016. – № 7 (61). – pp. 10–13.
4. Syslov, A.G. *Machinery Surface Layer Quality.* – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
5. Syslov, A.G., Shalygin, M.G., Kuznetsov, S.V. Investigation of surfaces with different machining at sub-roughness level // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2015. – № 9(51). – pp. 45–47.
6. Suslov, A.G., Poroshin, V.V., Shalygin, M.G., Kuznetsov, S.V. Correlation of nano-imperfections (sub-roughness of machinery surfaces and material grain) // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2015. – № 11(53). – pp. 3–7.

Рецензент д.т.н. А.Ю. Албагачиев



УДК 621.9.047
DOI: 10.12737/21422

Х.М. Рахимьянов, д.т.н.,
И.А. Леонтьев, инженер,
С.И. Василевская, аспирант
(Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20)
E-mail: kharis51@mail.ru; leontev@corp.nstu.ru

Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра

Показаны перспективы совмещения процессов электрохимического растворения и электроэрозионного удаления обрабатываемого материала при прошивке отверстий малого диаметра. Представлена схема формирования высоковольтных импульсов для управления параметрами комбинированной обработки. Показано, что введение электроэрозионной составляющей в процесс обработки позволило увеличить скорость прошивки отверстия более чем в 10 раз. Установлены ограничения в обеспечении точности формируемого отверстия, связанные с нестабильностью величины межэлектродного зазора.

Ключевые слова: электрохимический процесс; электроэрозионный процесс; микрообработка; комбинированная обработка; анод; катод-инструмент; межэлектродный зазор.

Kh. M. Rakhimyanov, D.Eng.,
I.A. Leontiev, Engineer,
S.I. Vasilevskaya, Post graduate student
(Novosibirsk State technical University,
20, K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073)

Technological prospects in combination of electro-erosion and electro-chemical processes in pinholes working

The prospects are shown in the combination of the processes of electro-chemical dilution and electro-erosion removal of material worked at pinholes broaching with a fixed cathode-tool. The procedure of high-voltage pulses formation for the parameter control of integrated working is presented. The source ensuring the formation of high-voltage pulses with voltage up to 400 V, duration of 4 mcs and a period from 12 to 50mcs is developed. The experimental plant has been developed for the integrated electro-erosion and electro-chemical broaching of pinholes at electrolyte supply under pressure through a fixed cathode-tool. It is shown that the introduction of an electro-erosion constituent in the course of working increased a broaching rate more than 10 times. The creation of channels of discharge on a gas-vapor jacket in a spark gap allows realizing current densities from 50...100 a/cm² at the primary moment and up to 10...15 a/cm² by the end of working. The limitations were established to ensure the accuracy of a hole formed and connected with the instability of the value of a spark gap. There is offered a way to increase a hole accuracy at the expense of the use of the working procedure with the stabilization of the value of a spark gap.

Keywords: electro-chemical process; electro-erosion process; microprocessing; combined working; anode; cathode-tool; spark gap.

В современном приборо- и машиностроении актуальным является решение задач по созданию средств технического и технологи-

ческого оснащения для изготовления деталей, геометрические размеры обрабатываемых поверхностей которых составляют доли милли-

метра. Подобные объекты получили название микроизделий, а процесс их изготовления – микрообработки [1].

В основу микрообработки зачастую заложены электрофизические технологии, поскольку, использование традиционных методов механической обработки в данном случае либо невозможно, либо связано с определенными трудозатратами [2].

Значительные успехи в микрообработке связаны с использованием электрохимической размерной обработки (ЭХРО), основанной на анодном растворении токопроводящих материалов [3]. Несмотря на достигнутые результаты в ЭХРО подобного рода изделий, существуют определенные ограничения, связанные, в первую очередь, с невысокой производительностью процесса.

В работе [4] представлены технологические возможности электрохимической обработки отверстий малого диаметра (менее 1 мм) неподвижным катодом-инструментом с прокачкой электролита через него. Авторами установлено, что при использовании струйной подачи электролита в межэлектродный зазор, когда струя, по сути, является формообразующим инструментом, наиболее эффективной представляется технологическая схема обработки с горизонтальным расположением катода-инструмента.

Выявленные закономерности формообразования отверстия свидетельствуют о снижении производительности по мере увеличения его глубины. В процессе обработки наблюдается постепенное уменьшение плотности тока, что объясняется ростом омического сопротивления столба электролита по мере увеличения межэлектродного зазора. Данный факт является характерным для ЭХРО с неподвижным катодом-инструментом.

Повышение достигнутого уровня плотности тока для увеличения производительности в рамках, действующих при ЭХРО электродных процессов, не представляется возможным. Решение задачи интенсификации анодного растворения в настоящее время осуществляется при использовании ряда способов, основными из которых являются: тепловой, гидравлический, лазерный [5, 6].

Интенсификация ЭХРО при использовании отмеченных способов реализуется за счет определенных механизмов активации анодного растворения обрабатываемого материала, а порой, и их совокупности. Повышение производительности обработки также возможно при введении дополнительных к электрохимиче-

скому растворению процессов удаления материала. Так электроалмазная обработка представляет собой комбинирование процессов анодного растворения материала и механического резания [7].

В настоящей работе изучаются возможности комбинирования электрохимических и электроэрозионных процессов при обработке отверстий малого диаметра в меди неподвижным катодом-инструментом в условиях струйной подачи электролита в межэлектродный зазор.

Не смотря на разную природу комбинируемых процессов – анодного растворения обрабатываемого материала в токопроводящей среде (электролите) и удаления материала за счет энергии электроэрозионных разрядов, при пробое диэлектрической среды существует возможность их объединения в одной обработке. Это обусловлено кинетикой развития электродных процессов при ЭХРО, связанной с тем, что в процессе электролиза межэлектродный зазор заполняется газообразными продуктами реакций, увеличивающих его омическое сопротивление.

Образование в межэлектродном зазоре парогазовой оболочки препятствует анодному растворению обрабатываемого материала. Электрический пробой парогазовой оболочки для организации канала проводимости требует приложения импульсного напряжения. Таким образом, если к электродам электрохимической ячейки помимо низковольтного постоянного напряжения приложить высоковольтное импульсное напряжение, достаточное для пробоя парогазовой оболочки в межэлектродном зазоре, в последнем реализуются два процесса – анодное растворение с образованием парогазовой оболочки и ее электрический пробой с формированием канала проводимости.

Возможна схема обработки, исключаящая постоянное напряжение на электродах. В этом случае начальная фаза высоковольтного импульса, когда увеличение напряжения сопровождается ростом тока в соответствии с законом Ома, определяет развитие стадии электрохимического процесса.

По мере заполнения межэлектродного зазора газообразными продуктами реакций с увеличением его омического сопротивления происходит замедление анодного растворения. При достижении значения напряжения в импульсе, при котором происходит пробой газобразной среды (ее ионизация), что обеспечивает формирование устойчивого канала разря-

да в толще электролита от катода до анода. Последнее характеризует действие второй стадии в обработке – электроэрозионной.

Для экспериментальной реализации комбинированной обработки был разработан источник высоковольтных импульсов, представленный на рис. 1. Источник содержит высоковольтную часть, включающую трансформатор Тр1–ЛАТР, разделительный повышающий

(220v/380v) трансформатор ТР2, мостовой выпрямитель VD1 с фильтрующим конденсатором C1, ограничительное сопротивление R1, накопительно-разрядный конденсатор C2, тиристор VD2, а также задающий генератор открывающих тиристор импульсов – G1. Трансформатор Тр2 обеспечивает гальваническую развязку сетевого напряжения и нагрузки.

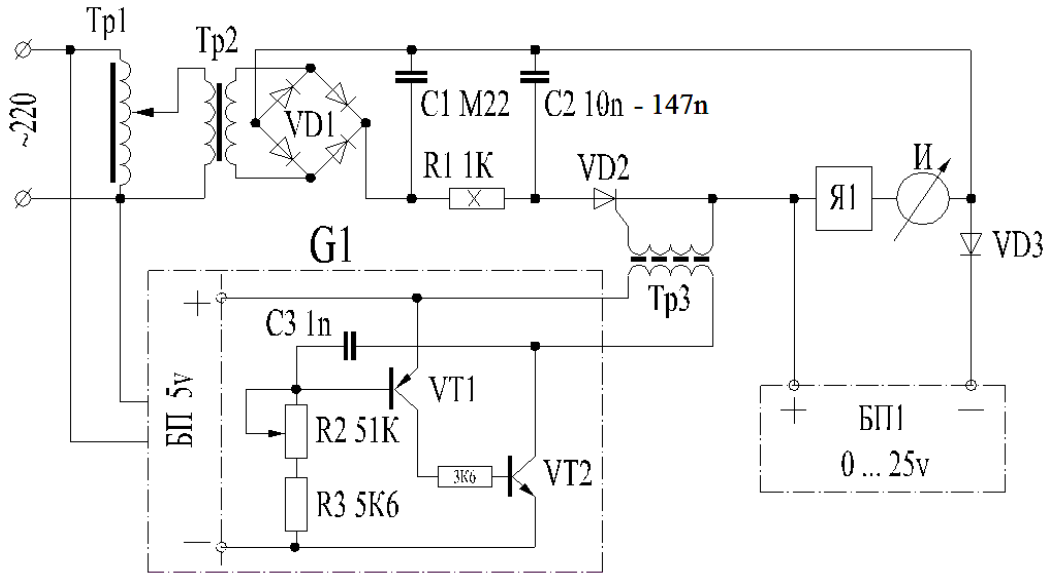


Рис. 1. Источник высоковольтных импульсов

Высоковольтные импульсы на нагрузку – электрохимическую ячейку «Я1» подаются с накопительно-разрядного конденсатора C2 через тиристор VD2 при открытии его короткими импульсами задающего генератора G1 через импульсный трансформатор Тр3.

Также на ячейку подается постоянное напряжение с регулируемого источника технологического тока БП1 с защитным диодом VD3.

Задающий генератор G1 выполнен по схеме релаксационного генератора на аналоге однопереходного транзистора. Последний выполнен на высокочастотных транзисторах разной проводимости VT1 – КТ361 и VT2 – КТ904. Нагрузкой генератора служит импульсный трансформатор Тр3, через который подаются открывающие импульсы на тиристор VD2. Питание задающего генератора осуществляется от стабилизированного пятивольтового блока питания БП5v.

Параметры высоковольтных импульсов, подаваемых на электрохимическую ячейку, определяются как высоковольтной частью источника, так и задающим генератором. Задающим генератором устанавливается длина

управляющих импульсов и период их следования. Длина управляющих импульсов определяется емкостью конденсатора C3 задающего генератора, а период – переменным сопротивлением R2 (сопротивление R3 – ограничительное). При подаче напряжения на задающий генератор начинает заряжаться конденсатор C3 через сопротивления R2 и R3. При достижении напряжения на конденсаторе равном напряжению пробоя однопереходного транзистора, последний лавинообразно открывается и в трансформаторе Тр3 формируется короткий импульс, определяемый длительностью разряда конденсатора C3, который через импульсный трансформатор Тр3 передается на управляющий электрод тиристора VD2.

Высокочастотная часть источника определяет мощность подаваемых на ячейку импульсов, которая зависит от величины подаваемого на накопительно-разрядный конденсатор C2 напряжения (задается с помощью ЛАТРа и от величины емкости конденсатора C2). При подаче напряжения на накопительно-разрядный конденсатор C2 он заряжается, а при открытии тиристора VD2 импульсом задающего генератора конденсатор разряжается на элек-

трохимическую ячейку. Ток в ячейке измеряется миллиамперметром И.

При выбранном значении емкости конденсатора С3 равной 1 нФ длительность управляющих импульсов ($t_{\text{и}}$) составляет 4 мкс, а сопротивлением R2 период повторения (Т) регулируется в диапазоне от 12 до 50 мкс.

Высокое напряжение на конденсаторе С1 для зарядки накопительно-разрядного конденсатора С2 при выбранном трансформаторе Тр2 (220v/380v) может достигать 530 В, но не должно быть более 85...90 % рабочего напряжения конденсаторов С1 и С2.

Форма высоковольтных импульсов на нагрузке (электрохимической ячейке «Я1») зависит от величины напряжения на конденсаторе С2 и его емкости (рис. 2).

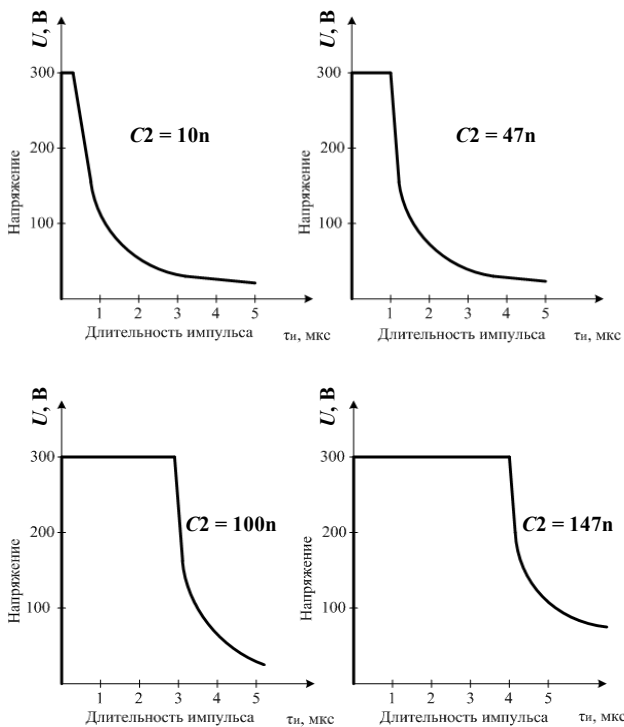


Рис. 2. Форма высоковольтных импульсов при различных значениях емкости накопительно-разрядного конденсатора С2

На рис. 3, 4 представлены структурная схема и внешний вид экспериментальной установки для комбинированной обработки отверстий малого диаметра. Фотография электродной системы электрохимической ячейки показана на рис. 5.

Обработка осуществляется в электрохимической ячейке 6, в которой установлен образец 2 для прошивки в нем отверстия, закрепленный в эбонитовой оправке 1. Полый электрод-инструмент 3 установлен в электрохими-

ческой ячейке с возможностью регулировки межэлектродного зазора Δ. Подача электролита в зону обработки осуществляется через полый электрод-инструмент 3 с помощью шарбаллона 4. Давление электролита регулируется компрессором 5. Излишки электролита из электрохимической ячейки 6 сливаются в бак 7.

Обрабатываемый образец 2 и электрод-инструмент 3, являющиеся анодом и катодом, соответственно, подсоединяются к источникам высоковольтных импульсов 8 и технологического тока 9. Контроль процесса осуществляется с помощью миллиамперметра 10 и осциллографа 11.

Экспериментальные исследования по прошивке отверстий проводились на образцах, выполненных из меди марки М1 (ГОСТ 859–2001). В качестве электролита использовался 5 %-ный водный раствор NaCl, выбор которого обоснован по результатам предварительных экспериментов [8, 9]. Результаты экспериментальных исследований по прошивке отверстий в меди полым электродом-инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров $\varnothing_{\text{кат}} = 0,26...0,46$ мм представлены на рис. 6.

Полученные результаты свидетельствуют об относительно равномерном увеличении глубины прошивки от времени обработки в исследованном диапазоне. Можно отметить влияние на производительность как параметров электрохимического процесса ($U_{\text{техн}}$), так и электроэрозионного ($U_{\text{имп}}$).

На рис. 7 представлены фотографии входных отверстий и поперечных сечений образцов, полученных при различных энергетических параметрах комбинированной обработки.

Как и при электрохимической прошивке [4] наблюдается появление конусности и расширение отверстия на входе с увеличением глубины, что является характерным для обработки неподвижным электродом-инструментом.

Для описания размеченного графа сравнение полученных результатов по комбинированной обработке отверстий малого диаметра с данными по размерной электрохимической обработке [4, 10] при одних и тех же условиях (обрабатываемый материал, состав электролита, давление струи, размеры электрода-инструмента, величина межэлектродного зазора, технологические режимы электрохимического процесса) свидетельствует о том, что совмещение электрохимического и электроэрозионного процессов в одной обработке обеспечивает повышение производительности больше чем на порядок.

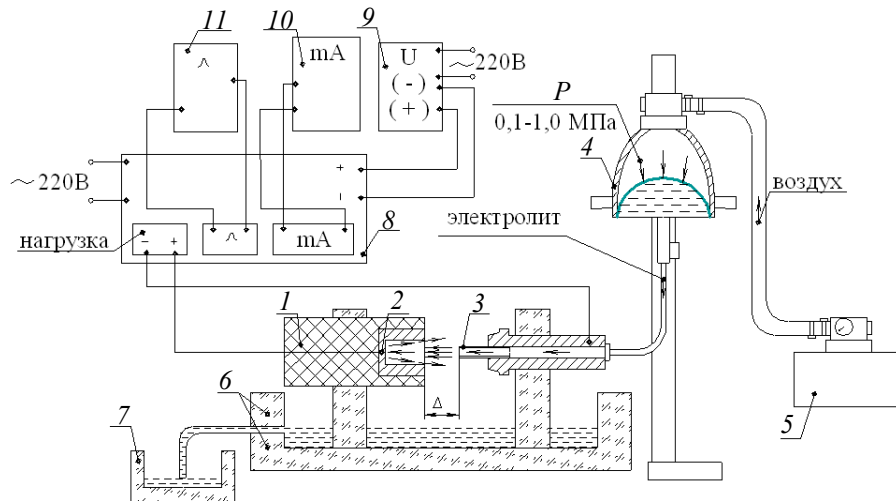


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки для комбинированной прошивки малых отверстий: 1 – оправка; 2 – образец-анод; 3 – инструмент-катод; 4 – шар-баллон; 5 – компрессор; 6 – электрохимическая ячейка; 7 – сливной бак; 8 – источник высоковольтных импульсов; 9 – источник технологического тока; 10 – миллиамперметр; 11 – осциллограф

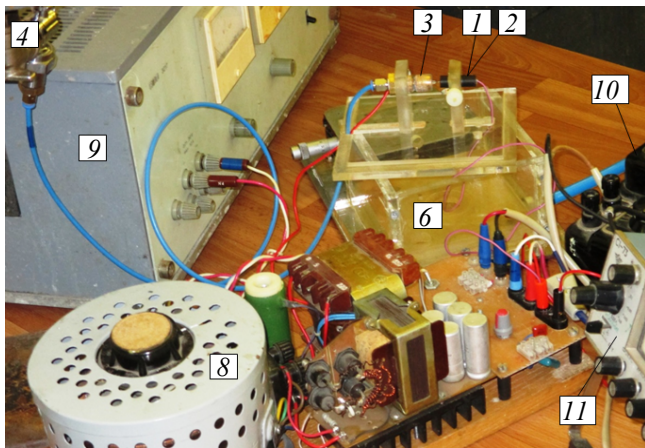


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки для комбинированной прошивки малых отверстий (компрессор 5 и сливной бак 7 на фотографии не показаны)

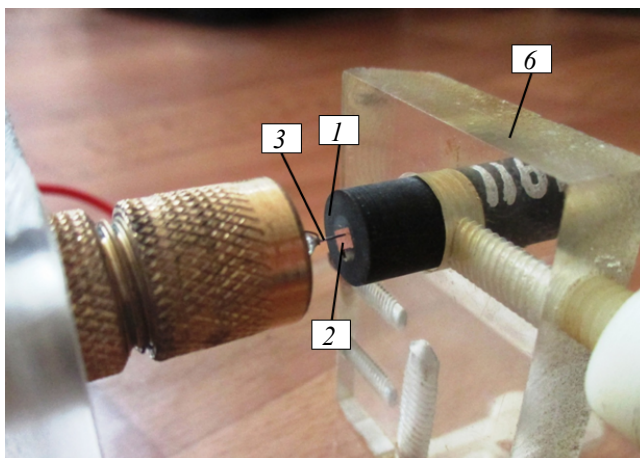


Рис. 5. Фотография электродной системы электрохимической ячейки для прошивки отверстий

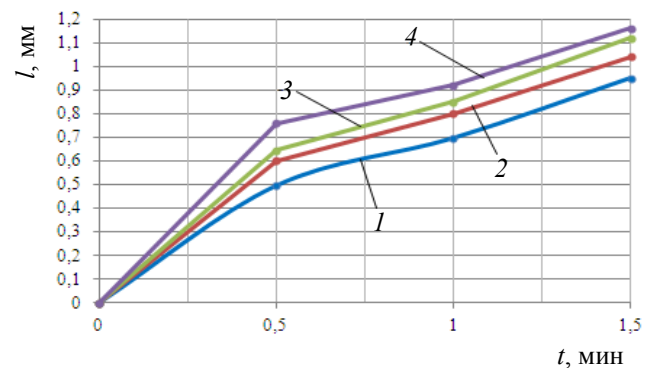


Рис. 6. Зависимость глубины прошивки отверстия от времени обработки

($P = 0,3$ МПа; $\tau_{\text{и}} = 4$ мкс; $T = 27,5$ мкс):

1 – $U_{\text{техн}} = 5$ В; $U_{\text{имп}} = 300$ В; 2 – $U_{\text{техн}} = 5$ В;

$U_{\text{имп}} = 400$ В; 3 – $U_{\text{техн}} = 20$ В; $U_{\text{имп}} = 300$ В;

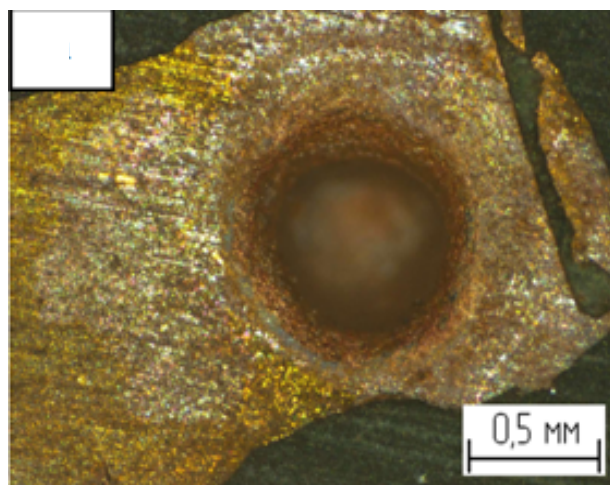
4 – $U_{\text{техн}} = 20$ В; $U_{\text{имп}} = 400$ В

Если на электрохимическую прошивку отверстия на глубину 0,4 мм при напряжении $U_{\text{техн}} = 5$ В необходимо затратить 10 мин, то введение в обработку электроэрозионной составляющей обеспечило прошивку отверстия на глубину от 0,6 до 0,76 мм за 30 с.

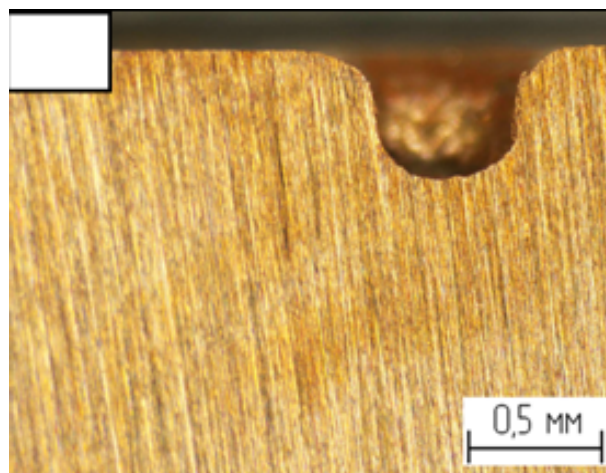
Скорость любого электрофизического процесса обработки материалов в основном определяется значением плотности мощности, реализуемой в зоне обработки. Если при электрохимической прошивке неподвижным катодом-инструментом в межэлектродном зазоре первоначальное значение плотности тока составляло $5 \dots 15$ А/см², которое по мере увеличения глубины обработки снижалось до $2 \dots 3$ А/см²,

то комбинирование электрохимического растворения с электроэрозионным разрушением материала позволило увеличить параметры

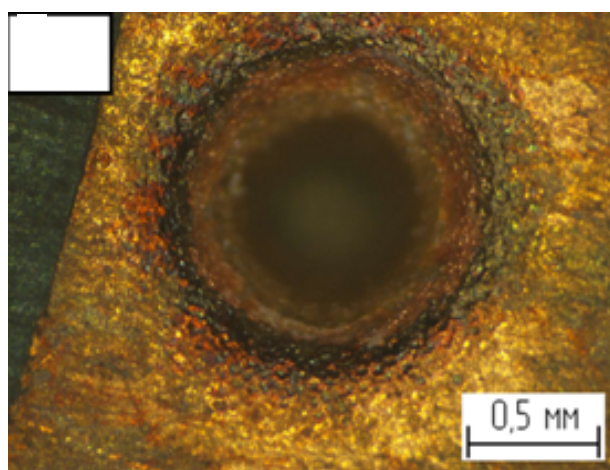
процесса до $50...100 \text{ А/см}^2$ на начальной стадии, до $10...15 \text{ А/см}^2$ при достижении глубины обработки $0,5...1,2 \text{ мм}$.



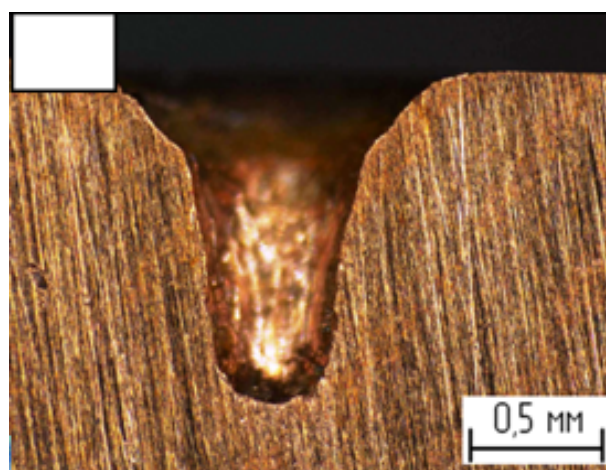
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Вид входного отверстия (а, в) и поперечного сечения образца (б, г):

а, б – $U_{\text{техн}} = 5 \text{ В}$; $U_{\text{имп}} = 300$; $t = 0,5 \text{ мин}$;

в, г – $U_{\text{техн}} = 20 \text{ В}$; $U_{\text{имп}} = 400 \text{ В}$; $t = 1,5 \text{ мин}$

Выводы

Введение высоковольтных импульсов амплитудой $300...400 \text{ В}$, длительностью до 4 мкс и периодом их следования до $27,5 \text{ мкс}$ при электрохимическом растворении меди позволило реализовать в межэлектродном зазоре комбинацию электрохимических и электроэрозионных процессов.

Создание каналов разряда на парогазовой оболочке в межэлектродном зазоре позволило реализовать плотности тока от $50...100 \text{ А/см}^2$ в первоначальный момент и до $10...15 \text{ А/см}^2$ в конце обработки, что привело к увеличению скорости процесса прошивки отверстий до 10 раз и более.

Снижение плотности тока и замедление

скорости обработки по мере увеличения глубины прошивки связано с ростом величины межэлектродного зазора при использовании схемы обработки с неподвижным катодом–инструментом. Искажение геометрии на входе отверстия также вызвано нестабильностью величины межэлектродного зазора. Повышение точности формообразования требует введения в схему обработки системы стабилизации межэлектродного зазора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веневцева, С.Н., Белоусов, И.А. Микроэлектрохимическая обработка материалов с применением наносекундных импульсов технологического напряжения // Со-

временная электротехнология в промышленности России (молодежные инновации); сб. трудов науч.- техн. конф. Тула, 7 октября 2011 г. – Тула: ТулГУ, 2011. С. 9 – 10.

2. Левинсон, Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения). – Л.: Машиностроение, 1977. – 152 с.

3. Мороз, И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.

4. Рахимьянов, Х.М., Василевская, С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом – инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2. – С. 12–20. – Doi:10.17212/1994 – 6309–2016–2–12–20.

5. Рахимьянов, Х.М., Журавлев, А.И., Гаа, Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2. – С. 135–144.

6. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) / IFOST. Novosibirsk – Tomsk, Russia, June 23 – 29: Proceedings of the third international forum on strategic technologies. Novosibirsk. NSTU – 2008. P. 106–107.

7. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Рахимьянов, К.Х. Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С. 32–33.

8. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Василевская, С.И. Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: матер. VI междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100–104.

9. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Василевская, С.И. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3 (68). – С. 58–65. – Doi: 10.17212/1994 – 6309 –2015–3–58 –65.

10. Смоленцев, В.П., Шаров, Ю.В., Коптев, И.Т. Многоэлектродная обработка каналов в фильтрах тепловых двигателей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №8(50). – С. 22–27.

technological voltage // *Modern Electro-Technology in Industry of Russia (youth innovations): Proceedings of the Scientific-Eng. Conf., Tula, October7, 2011* – Tula: TulSU, 2011. pp. 9 – 10.

2. Levinson, E.M. *Pinholes (Manufacturing methods)*. – L.: Mechanical Engineering, 1977. – pp.152.

3. Moroz, I.I. *Electrochemical Dimensions Working of Metals*. – M.: “Mechanical Engineering”, 2009. – pp. 279.

4. Rakhimyanov, H.M., Vasilevskaya, S.I. Technological potentialities of pinholes electrochemical working with fixed cathode-tool // *Metal Working (Techniques, Equipment, Tool-ware)*. – 2016. – № 2. – pp. 12–20. – Doi:10.17212/1994 – 6309–2016–2–12–20.

5. Rakhimyanov, H.M., Zhuravlyov, A.I., Gaar, N.P. Plant for researches of electrochemical processes under conditions of laser activation of electrochemical dimensions working // *Scientific Bulletin of NSTU*. – 2010. – № 2. – pp. 135–144.

6. Rakhimyanov H.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) / IFOST. Novosibirsk – Tomsk, Russia, June 23 – 29: Proceedings of the third international forum on strategic technologies. Novosibirsk. NSTU – 2008. P. 106–107.

7. Rakhimyanov, H.M., Krasilnikov, B.A., Rakhimyanov, K.H. Shaping accuracy at electro-diamond grooving in amorphous and nano-crystalline alloys // *Metal Working (Techniques, Equipment, Toolware)*. – 2006. – № 2. – pp. 32–33.

8. Rakhimyanov, H.M., Krasilnikov, B.A., Vasilevskaya, S.I. Investigations of electrolytes ensuring accuracy of electrochemical working of M1 copper // *Innovations in Mechanical Engineering - Basis of Russia Technological Development: Proceedings of the VI-th Inter. Scientific-Tech. Conf. – Barnaul, 2014*. – Part. 2. – pp. 100–104.

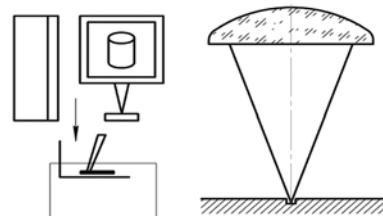
9. Rakhimyanov, H.M., Krasilnikov, B.A., Vasilevskaya, S.I. Degree of process localization at intensification of copper anode dilution // *Metal Working (Techniques, Equipment, Toolware)*. – 2015. – № 3 (68). – pp. 58–65. – Doi: 10.17212/1994 – 6309 –2015–3–58 –65.

10. Smolentsev, V.P., Sharov, Yu.V., Koptev, I.T. Multi-electrode working of channels in filters of warm engines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №8(50). – pp. 22–27.

REFERENCES

1. Venevtsova, S.N., Belousov, I.A. Microelectro-chemical processing of materials with use of nano-second pulses of

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев



**А.Г. Григорьянц, д.т.н., И.Н. Шиганов, д.т.н.,
Д.М. Мельников, к.т.н., М.А. Якимова, ассистент**
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1)
E-mail: mt12@bmstu.ru

Технологические основы определения степени изменения кинематической вязкости жидкой среды методом лазерного фазового анализа*

Оперативный контроль состояния смазочных материалов важен для поддержания эффективности работы машин и механизмов. Экспресс контроль при этом позволяет определять степень отработки масла непосредственно во время его эксплуатации. В данной работе предлагается методика определения зависимости вязкости смазочных материалов от температуры.

Ключевые слова: экспресс анализ; дизельное топливо; кристаллизация; вода; лазер.

**A.G. Grigoriyants, D.Eng., I.N. Shiganov, D.Eng.,
D.M. Melnikov, Can.Eng., M.A. Yakimova, Assistant**
(Bauman STU of Moscow, 5, Building 1,
2-d Baumanskaya Str., Moscow, Russia 105005)

Technological fundamentals for definition of changes in liquid medium kinematic viscosity by method of phase analysis

An active control of a lubricant state is significant for the support of operating efficiency in machinery. At the same time a rapid control allows defining the degree of lubricating oil use directly during its operation. This paper reports the procedure offered for the definition of the dependence of lubricating material viscosity upon temperature. This dependence obtaining in the course of material operation may characterize its application in specified temperature conditions which can deteriorate because of pollution, or wear. The method developed can be realized as a compact rapid device and used at the operation of lubricating materials for the control of a degree of their use from the point of view of viscosity temperature stability.

Keywords: rapid analysis; diesel oil; crystallization; water; laser.

Проведение эффективного контроля состояния смазочных материалов направлено на решение одной из наиболее актуальных задач эксплуатации машин и механизмов – поддержание эффективности работы приводных систем. Нарушение работы смазки неизбежно ведёт к снижению показателей приводов, что сказывается как на стоимости эксплуатации, так и на конкурентоспособности механизма в целом [1].

Необходимость контроля смазочных мате-

*Статья выполнена в рамках работ по гранту от Российского научного фонда № 141901216.

риалов связана с непрерывным процессом ухудшения их свойств в процессе эксплуатации. Причин возникновения такой ситуации может быть несколько, и они связаны как с естественными процессами, так и с недостаточным качеством материала [2].

Современные масла получают на основе базового – минерального или синтетического масла и дальнейшего обогащения его присадками, которые призваны обеспечить необходимый для материала комплекс свойств. В процессе работы присадки могут отработываться, что ведёт к деградации масла.

Другая причина ухудшения свойств – загрязнение примесями: водой [3], механическими частицами [4] и др. Попадание воды происходит при нарушении хранения материала или конструктивных ошибках в механизме. К главной причине попадания механических частиц можно отнести загрязнение продуктами износа движущихся частей [5]. Так же в масло может попадать нагар, что обусловлено моющим эффектом [6] или пыль, что особенно актуально, например, при эксплуатации гидроприводов строительной техники, где сильное загрязнение может стать даже причиной отказа системы и, соответственно, существенных затрат на ремонт [7].

Для предотвращения негативных эффектов связанных с ухудшением свойств смазочных материалов необходимо производить своевременную замену масел. Срок службы определяется по итогам многочисленных исследований, которые проходят как на стадии разработки масла, так и на стадии его производства, после чего завод-изготовитель может давать соответствующие рекомендации.

Производители техники так же проводят собственные исследования, чтобы лучше оценить непосредственное влияние условий эксплуатации. После окончания срока службы масла производится его замена (либо частичная замена), но важным вопросом остаётся установление точного момента, когда замена эффективна. Если менять масло слишком рано, растут общие затраты на смазочные материалы, а если слишком поздно – может происходить снижение эффективности работы механизма вплоть до его поломки [7].

Решением этой проблемы является контроль масел в процессе эксплуатации, который может проводиться двумя путями: лабораторным и экспрессным. Лабораторные химические и физико-химические методы, как правило, не подходят для такой задачи по причине их сложности и удалённости. Поэтому широкое распространение получили различные экспресс приборы по анализу жидких сред, основанные на оптических, диэлектрических и других методиках [3, 8, 9].

Одним из важных параметров смазочных материалов являются кинематическая или динамическая вязкость. Связано это со следующими факторами:

- пониженная вязкость может приводить к повреждению движущихся частей механизма;
- повышенная вязкость может являться причиной снижения эффективности работы системы, засорения фильтров и пр.

По этим причинам для каждого механизма значение вязкости подбирается индивидуально. Но необходимо иметь в виду, что в дальнейшем при эксплуатации механизма это значение необходимо поддерживать на должном уровне, что сопряжено с рядом особенностей.

При изменении температуры от 0 до 100 °С вязкость масла может изменяться на несколько порядков, оно становится более жидким. При понижении температуры происходит обратный эффект. Параметр, который определяет как изменяются свойства среды при изменении температуры, носит название индекс вязкости.

Однако его использование ограничено температурными точками 40 и 100 °С, при которых индекс вязкости определяется согласно ASTM D 2270. Для многих смазочных материалов температурный интервал, в котором вязкость остаётся на требуемом уровне, необходимо подбирать индивидуально.

При рассмотрении системы смазки на примере ДВС можно выделить следующие факторы, на которые влияет вязкость масла:

- толщина образуемой масляной пленки в парах трения (надёжность разделения трущихся поверхностей при высоких температурах, стойкость к разрушению до добавления противоизносных присадок);
- лёгкость пуска двигателя в холодную погоду;
- мощность двигателя и коэффициент полезного действия двигателя;
- количество осадков, образующихся в картерном масле;
- расход топлива;
- расход масла.

Для выявления температурных свойств масел необходимо проводить контроль изменения их вязкости в заданном интервале температур. Измерение кинематической вязкости масла производится при помощи вискозиметров, которые подразделяются на три основных типа: капиллярные; ротационные; прочие типы, к которым относятся приборы, измеряющие время падения шарика в жидкости, сопротивление вибрации зонда или давление, оказываемое жидкостью на зонд.

В качестве экспресс приборов наиболее распространены ротационные вискозиметры, а также другие [10, 11]. Среди параметров, характеризующих изменение вязкости с изменением температуры, чаще всего применяется индекс вязкости, определение которого производят путём измерения кинематической вязкости при 40 и 100 °С, а сам индекс опре-

деляют затем из таблиц по ASTM D 2270 или ASTM D 39B. Так как индекс вязкости определяется при 40 и 100 °С он не связан с низкотемпературной вязкостью, которую определяют вискозиметром Брукфильда и вискозиметрами высокой скорости сдвига.

Очень часто при эксплуатации техники известно в каких пределах лежит допустимый диапазон значений вязкости рабочей смазочной среды, и при анализе достаточно узнать эти значения.

Решить эту задачу способен метод лазерного фазового анализа (ЛФА), описанный в работах [12, 13], при помощи которого можно исследовать ряд параметров жидких нефтепродуктов, в том числе масел. Данный метод может быть легко реализован в виде компактного экспресс прибора. Отличительная особенность заключается в том, что с его помощью можно оперативно определять сразу несколько показателей исследуемой среды, например: содержание воды, точку застывания, механические примеси [12].

Сущность метода заключается в следующем. Жидкий образец помещают в кювету, присоединённую к термоэлементу. Поверхность образца непрерывно сканируется лазерным излучением. По изменению оптических свойств пробы в процессе изменения её температуры судят о значении искомого свойства пробы.

Определение параметров вязкости сред так же может быть осуществлено при помощи метода ЛФА. Для этого вводится механизм покачивания пробы. При покачивании угол наклона жидкости к лазерному лучу изменяется, что ведёт к изменению уровня принимаемого сигнала.

По величине отклонений можно определять насколько изменяется вязкость среды. Целью данной работы является разработка технологических основ определения степени изменения кинематической вязкости жидкой среды методом ЛФА. Решение этой задачи может позволить применять экспресс прибор на основе ЛФА для оперативного контроля параметров смазочных материалов, что особенно актуально для работоспособности техники, работающей в сложных условиях (например, строительная техника).

Методика исследований

Разработка методики оценки изменения вязкости жидких сред при изменении температуры основана на регистрации лазерного излучения, проходящего через среду, при периодическом отклонении положения поверх-

ности жидкости относительно оптического пути. Схема данного процесса показана на рис. 1.

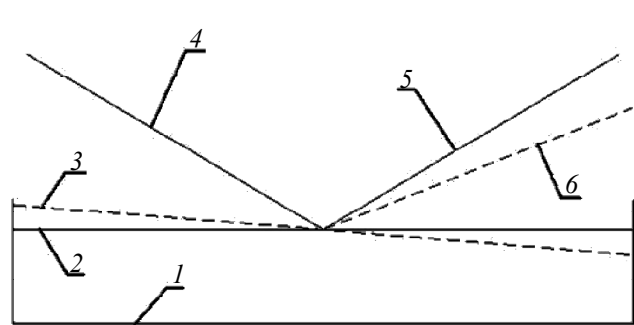


Рис. 1. Схема отклонения лазерного луча при покачивании кюветы:

1 – кювета с образцом; 2 – нормальное положение поверхности жидкости; 3 – наклонное положение поверхности жидкости; 4 – падающий луч; 5 – отражённый луч при нормальном положении кюветы; 6 – отражённый луч при наклонном положении кюветы

Реализуется этот процесс путём покачивания блока, содержащего кювету с образцом относительно остальной части исследовательского стенда (рис. 2), содержащей источник и приёмник лазерного излучения. При этом происходит свободное течение жидкости из начального положения в наклонное, скорость которого связана с динамической вязкостью вещества.

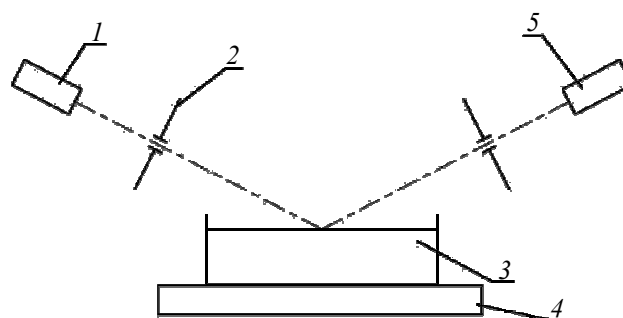


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – кювета с образцом; 4 – термоэлемент; 5 – приёмник излучения

Интенсивность лазерного излучения, проходящего через вещество в каждом положении кюветы будет изменяться, благодаря чему можно оценивать, в каком положении находится кювета в каждый момент времени. При повышении вязкости жидкости понадобится больше времени для перехода в конечное положение, что можно зафиксировать при помощи лазерного излучения. Путём оценки ам-

плитуды и времени колебаний интенсивности регистрируемого излучения в данной работе производилась оценка изменения вязкости.

Исследовательский стенд представляет собой лазерный нефелометр с возможностью изменения температуры среды. Излучение от непрерывного лазера 1 (вторая гармоника Nd:YAG) с длиной волны 532 нм после прохождения диафрагмы 2 попадало под углом в кювету 3, затем излучение проходило сквозь образец и отражалось от дна кюветы, сделанного зеркальным.

Менисковый эффект исключался тем, что кювета накрывалась прозрачной крышкой, соприкасавшейся с поверхностью образца. Благодаря встроенному элементу Пельтье 4, производилось изменение температуры образца. Диафрагма 2 пропускает излучение, распространяющееся в малом телесном угле относительно оптической оси. Излучение регистрировалось фотодиодным приемником 5. Для измерения температуры образца использовалась термопара.

Исходя из данных работы [13] скорость охлаждения образцов при проведении процесса устанавливалась на значении 7 °С/мин. При такой скорости достигалось достаточно равномерное застывание вещества. Погрешность измерения рассеянной мощности излучения составила порядка 5 %.

В качестве модельных сред использовалась вода и гидравлическое масло АМГ-10. Характер замораживания таких сред хорошо известен, либо изучался ранее [14]. Гидравлическое масло АМГ-10 изготавливается на основе специально подобранного высокоочищенного маловязкого нефтяного базового масла с ультранизкой температурой застывания.

Масло содержит эффективный загуститель с высокой стойкостью к деструкции и присадки, улучшающие антиокислительную стабильность, противоизносные и антикоррозионные свойства. Масло в качестве рабочей жидкости обеспечивает надежную эксплуатацию гидравлических систем и устройств, работающих в интервале температур окружающей среды от -60 до +55 °С.

В процессе исследования образцов происходит постоянное изменение угла наклона их поверхности относительно оптической схемы. По этой причине важным параметром для исследования является диаграмма направленности лазерного излучения. В данной работе использовался одномодовый лазерный излучатель с распределением близким к Гауссовому. «Хвосты» распределения отсекались диа-

фрагмой 2. Это позволяло не учитывать изменение распределения интенсивности при наклоне кюветы.

Кювета выполнена таким образом, чтобы при покачивании жидкость не выливалась за её пределы, одновременно с этим высота стенки не влияет на перекрытие лазерного излучения, что реализуется при помощи диафрагмы 2. Она отсекает диаметр пучка, не попадающий на стенку кюветы.

В процессе покачивания на поверхности жидкости происходят затухающие колебания, но стенд выполнен таким образом, чтобы минимизировать этот процесс путём плавного покачивания.

Проведение экспериментов

Экспериментальное исследование изменения вязкости жидких сред при изменении температуры производилось для двух сред: воды и гидравлического масла. Вода использовалась как опорная среда, необходимая для проверки методики, т.к. изменение её вязкости известно во всём диапазоне температур жидкого состояния. На рис. 3 показана зависимость ослабления лазерного излучения, проходящего через воду при её нагревании в диапазоне температур от +15 до -5 °С.

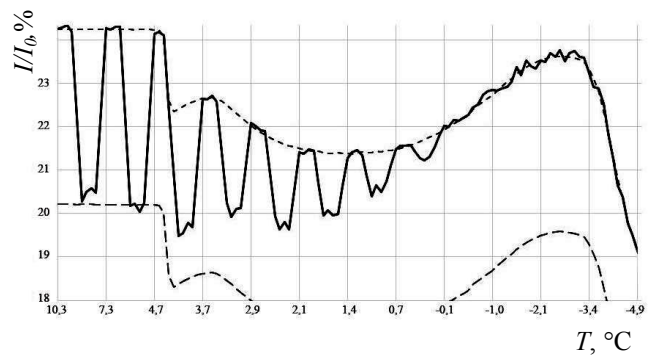


Рис. 3. Зависимость ослабления лазерного излучения при охлаждении воды (пунктирными линиями показаны аналогичные зависимости без покачивания кюветы для нормального и наклонного положения кюветы)

На рисунке видно, что амплитуда колебаний затухает при снижении температуры, что, по-видимому, связано с кристаллизацией воды и снижением её подвижности. Колебания прекращаются около 0 °С, что соответствует точке застывания воды. После проведения оценки затухания колебаний была построена зависимость снижения подвижности (рис. 4).

Непосредственно значения кинематической вязкости в данной работе не рассчитывались, однако используя зависимость, показанную на рис. 4, можно оценивать насколько процентов выросла вязкость, что имеет значение с точки зрения технологической применимости вещества.

Аналогичное исследование проводилось для гидравлического масла. Итоги оценки изменения вязкости для масла АМГ-10 представлены на рис. 5.

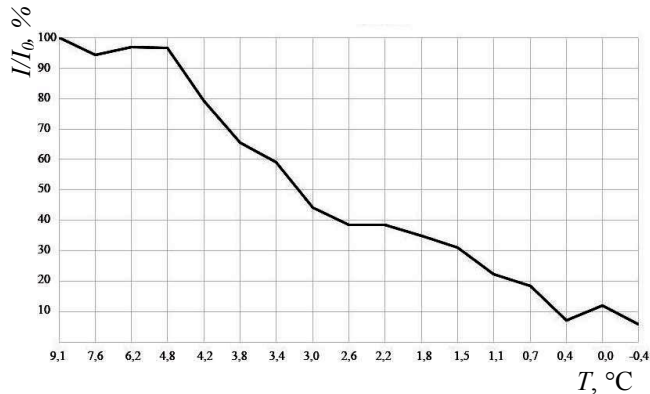


Рис. 4. Снижение текучести воды при замораживании



Рис. 5. Снижение текучести гидравлического масла при замораживании

Кривые, полученные способом, описываемом в данной работе (см. рис. 4 и 5) имеют большую информативность, чем такие показатели как индекс вязкости, так как позволяют оценить динамику изменения вязкости, что имеет первостепенное значение при использовании смазочных материалов при переменных температурных условиях эксплуатации.

Выводы

В данной работе была предложена методика оценки изменения вязкости жидких сред при изменении температуры. Разработка ме-

тодики базировалась на экспериментальном исследовании изменения интенсивности лазерного излучения, проходящего через среду, при периодическом отклонении положения поверхности жидкости относительно оптического пути. Получены кривые характеризующие рост вязкости при замораживании модельных сред: воды и гидравлического масла.

Разработанная методика может быть востребована при контроле смазочных материалов благодаря следующим характеристикам:

- точность измерений составляет порядка 5 %;
- время проведения одного измерения составляет порядка 10 мин, что позволяет считать методику экспрессной;
- методика может быть реализована в виде компактного экспресс прибора и применяться непосредственно на местах хранения и эксплуатации смазочных материалов;
- можно проводить контроль изменения вязкости в широком диапазоне температур от -50 до +150 °C.

Определение характера изменения вязкости смазочных материалов позволяет сделать вывод о возможности их использования в конкретных температурных условиях. Сопоставление с аналогичными калибровочными кривыми может стать критерием выявления степени отработки масла, так как наличие примесей и нарушение состава масла влияет на модель его замораживания [14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дунаев, А.В. Экспресс-контроль масла для снижения износов и предотвращения аварий моторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 16. – № 12. – С. 420–428.
2. Кустарёв, Г.В., Дудкин, М.В., Гурьянов, Г.А. Обеспечение чистоты и поддержание эксплуатационных свойств рабочих жидкостей гидропривода строительных и дорожных машин // Вестник МАДИ. – 2008. – № 2. – С. 43–47.
3. Крицкая, Е.Б., Чиж, Д.В. Физико-химические методы определения воды в нефтепродуктах // Успехи современного естествознания. – 2011. – №11. – С. 75.
4. Кузьмин, Н.А., Пачурин, Г.В., Кузьмин, А.Н. Анализ отложений в автомобильных двигателях. Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – С. 226.
5. Можяев, О.С., Попов, Е.С. Топливная эффективность судового машинно-двигательного комплекса // Вестник АГТУ: сер. «Морская техника и технология». – 2014. – № 2. – С. 95 – 98.

6. **Martin Reik, Jung Frank.** Contamination of Lubrication Oils / Theo Mang // Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Vol.1. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. P. 292- – 313.

7. **Можжаев, О.С., Попов, Е.С.** Топливная эффективность судового машинно-двигательного комплекса // Вестник АГТУ; сер. «Морская техника и технология». – 2014. – № 2. – С. 95 – 98.

8. **Пат. 2243544 РФ.** Индикатор марки автомобильного бензина / А.В. Ляшенко, Э.И. Жалковский, В.А. Костяков; заявл. 26.03.2003; опубл. 27.12.2004.

9. **Пат. 2287811 РФ.** Прибор для экспресс-контроля качества автомобильного бензина / А.В. Ляшенко, Э.И. Жалковский, В.А. Костяков, заявл. 25.11.2005; опубл. 20.11.2006.

10. **Пат. 2263301 РФ.** Способ экспрессного определения кинематической вязкости авиационных керосинов и дизельных топлив / Е.И. Алатортцев, В.Н. Зрелов; заявл. 26.03.2003; опубл. 27.12.2004.

11. **Якимова, М.А., Алехнович, В.И., Григорьянц, А.Г.** Фотометрический контроль параметров коллоидных растворов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 3 (33). – С. 42 – 45.

12. **Мельников, Д.М., Шиганов, И.Н.** Влияние скорости охлаждения образцов на показатели метода лазерного фазового анализа // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 3(33). – С. 25 – 27.

13. **Шиганов, И.Н., Мельников, Д.М., Якимова, М.А.** Оборудование и методики лазерного экспресс-анализа нефтепродуктов // Фотоника. – 2016. – № 3. – С. 98 – 107.

14. **Мельников, Д.М., Шиганов, И.Н.** Определение вязкости моторных топлив методом лазерного фазового анализа // Технология машиностроения. – 2013. – № 10. – С. 47–50.

REFERENCES

1. Dunayev, A.V. Lubricating oil rapid control to reduce wear and prevent engine failure // *Mining Information-Analytical Bulletin*. – 2009. – Vol. 16. – № 12. – pp. 420–428.

2. Kustaryov, G.V. Dudkin, M.V., Gurianov, G.A. Ensuring cleanness and performance attributes support in working

liquids of hydraulic actuator in construction and road machinery // *Bulletin of MARI*. – 2008. – № 2. – pp. 43–47.

3. Krinitskaya, E.B., Chizh, D.V. Physical-chemical methods for water definition in oil products // *Success in Modern Natural Science*. – 2011. – № 11. – pp. 75.

4. Kuzmina, N.A., Pachurin, G.V., Kuzmin, A.N. Analysis of depositions in motor car engines. *Current Problems in Science and Education*. – 2014. – № 1. – pp. 226.

5. Mozhaiev, O.S., Popov, E.S. Fuel efficiency of ship engine-mover unit // *Bulletin of ASTU: set “Marine Equipment and Technology”*. – 2014. – № 2. – pp. 95 – 98.

6. Martin Reik, Jung Frank. Contamination of Lubrication Oils / Theo Mang // Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Vol.1. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. P. 292- – 313.

7. Mozhaiev, O.S., Popov, E.S. Fuel efficiency of ship engine-mover unit // *Bulletin of ASTU; Set “Marine Equipment and Technology”*. – 2014. – № 2. – pp. 95 – 98.

8. Pat. 2243544 RF. Indicator of motor gasoline brand / A.V. Lyashenko, E.I. Zhalkovsky, V.A. Kostyakov; applic. 26.03.2003; published. 27.12.2004.

9. Pat. 2287811 RF. Device for rapid test of engine gasoline quality / A.V. Lyashenko, E.I. Zhalkovsky, V.A. Kostyakov, applic. 25.11.2005; published 20.11.2006.

10. Pat. 2263301 RF. Method for rapid definition of kinematic viscosity of aviation kerosene and diesel oil / E.I. Alatorstsev, V.N. Zrellov; applic. 26.03.2003; published 27.12.2004.

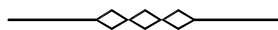
11. Yakimova, M.A., Alekhovich, V.I., Grigoriyants, A.G. Photometric control of colloid solution parameters // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 3 (33). – pp. 42 – 45.

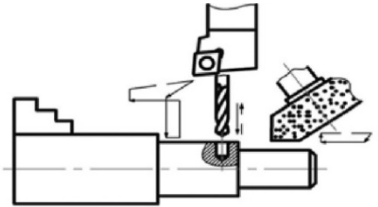
12. Melnikov, D.M. Shiganov, I.N. Impact of sample cooling rate upon indices of laser phase analysis method // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 3(33). – pp. 25 – 27.

13. Shiganov, I.N., Melnikov, D.M., Yakimova, M.A. *Equipment and Procedures for Laser Rapid Analysis of Oil Products* // Photonics. – 2016. – № 3. – pp. 98 – 107.

14. Melnikov, D.M., Shiganov, I.N. Definition of engine fuels viscosity by method of laser phase analysis // *Engineering Techniques*. – 2013. – № 10. – pp. 47–50.

Рецензент д.т.н. И.И. Артемов





УДК 621.91.01
DOI: 10.12737/21424

О.Н. Федонин, д.т.н., **А.В. Хандожко**, д.т.н.,
А.Н. Щербаков, к.т.н., **Л.А. Захаров**, к.т.н.,
Е.А. Польский, к.т.н.

(Брянский государственный технический университет (БГТУ (БИТМ)),
241035, РФ, г. Брянск, бул. 50-летия Октября, 7)
E-mail: chandosh@yandex.ru

Проектирование металлорежущих станков с использованием унифицированных изделий

Изложены вопросы, связанные с проблемами проектирования металлорежущих станков на базе унифицированных деталей, узлов. Рассмотрены особенности проектных работ, новые задачи и пути их решения. Материал представлен на основе опыта проектирования и изготовления опытного образца шлифовально-заточного станка с ЧПУ.

Ключевые слова: проектирование; обеспечение качества; точность металлорежущих станков.

O.N. Fedonin, D.Eng., **A.V. Khandozhko**, D.Eng.,
A.N. Shcherbakov, Can.Eng., **L.A. Zakharov**, Can.Eng.,
E.A. Polsky, Can.Eng.

(Bryansk State Technical University (BSTU (BIHE)),
7, 50 Years of October Avenue, Bryansk 241035, RF)

Machine-tool design using common parts

This paper reports the peculiarities of metal-tool design with the wide use of finished common modules with a different degree of integration. Such an approach has found a wide use in practice abroad and develops intensively in domestic mechanical engineering. This current trend poses to engineers and scientists new tasks. A number of aspects of this problem is considered in the paper presented. The change of the modern enterprises structure, from technological potentialities, development of materials science, new technological capabilities and limitations are manifested in different forms. One of them is a trend to the application of nonconventional materials for system carriers. In the paper there are stated merits and demerits, the analysis of the experience in the reinforced concrete and organic concrete application for these purposes.

The problems of changes in design computations content are considered in the paper. In particular, by the example there is shown a necessity to solve problems connected with contact deformations. Other significant trend in computations – a versatile analysis of complex spatial dimensions successions complicating because of the growth of assembly number.

Keywords: design; quality ensuring; machine-tool accuracy.

Проектирование технологического оборудования, в частности металлорежущих станков, является сложной задачей, решению которой всегда уделялось много внимания. В результате большого числа научно-технических работ была сформирована достаточно полная методика проектирования изделий этого типа. Но любые методики требуют постоянной корректировки в соответствии с изменениями в области материаловедения, машиностроения, технологии механической обработки, метрологическим обеспечением,

современными требованиями к технико-экономическим показателям и организации производственного процесса.

Характерной особенностью современного производства является постоянно углубляющаяся специализация производств. Это направление характерно и для станкостроения. Доля предприятий, работающих в рамках полного производственного цикла снижается, при увеличении предприятий, ориентированных на создание станков на базе унифицированных модулей различной степени интегра-

ции.

Одновременно наблюдается формирование производств и производственных объединений, специализирующихся на производстве унифицированных деталей, узлов, механизмов, устройств. Такая специализация ярко выражена для производства шарико-винтовых передач (ШВП), рельсовых направляющих, электродвигателей, поворотных механизмов. Это позволяет предприятиям увеличивать объемы выпуска продукции, переходить к хорошо технологически оснащённому крупносерийному и массовому производству.

Степень интеграции продукции широко варьируется от отдельных деталей до готовых к монтажу и подключению координатных осей (столов, головок). Продукция при этом выпускается в широком ассортименте как с точки зрения типоразмерных рядов, так и качества. В частности, те же ШВП выпускаются как для прецизионных станочных узлов, так и для транспортно-грузоподъемных устройств общего назначения, с соответствующим изменением точности и других параметров качества.

С учетом широкой кооперации, наличия на рынке готовых модулей, развития рынка услуг по изготовлению заготовок и их механической обработки производство станочного оборудования перестало быть нишей только для специализированных крупных предприятий полного цикла. Возникло значительное число небольших станкостроительных предприятий, которые в принципе не могут иметь у себя все технологические переделы — литье, объемную штамповку, гальванопокрытия и др. Специализация в ряде случаев доходит до превращения таких предприятий в только сборочные производства изделий, в том числе низкого качества. При этом ценовые характеристики, несовершенство законодательства по закупкам приводят к демпингу со стороны недобросовестных производителей как отечественных, так и зарубежных.

С учетом ошибок менеджмента, неправильной технической политики, требований антимонопольного законодательства такая продукция находит спрос. Особенно это опасно для оборудования, которое традиционно или по состоянию на текущий момент не выпускается в РФ. Примером являются шлифовально-заточные станки, в частности с ЧПУ.

Предприятия, в том числе работающие на оборонную промышленность, используют исключительно импортные станки. Это опасно для обеспечения экономической независимости

государства, что подтвердили санкции, принятые к нашей стране. Сегодня возникли трудности с приобретением некоторых моделей станков. Даже для оборудования, приобретаемого в Белоруссии, необходимо получать разрешение у Еврокомиссии для подключения пятой управляемой координаты. Поэтому для экономической и политической независимости страны, жизненно необходимо налаживание собственного производства качественных станков.

Новые возможности по созданию технологического оборудования в целом и металлообрабатывающих станков в частности создают не только предпосылки расширения круга производителей, но и проблемы при проектировании и производстве продукции высокого качества. При широком использовании покупных деталей и узлов, некотором ограничении технологических возможностей состав, порядок и объем проектных процедур меняются. Часть процедур исчезает, часть меняет объем и содержание, возникают и новые. Существующие методики проектирования, технологические рекомендации требуют определенных изменений и дополнений. Остановимся на некоторых, наиболее характерных и интересных тенденциях.

При использовании модульных решений возрастает роль компоновочного проектирования. В связи с этим определенное развитие требует методика анализа, созданная Ю.Д. Враговым. Растет актуальность поиска оптимального компоновочного решения. Благодаря модульности конструкции многие ограничения сегодня исчезли.

Существенно меняется подход к проектированию базовых деталей (станин, коробок). Значительная часть небольших машиностроительных заводов избавляются от литейного производства, особенно чугунолитейного. В связи с этим появились ограничения по доступности изготовления заготовок чугунных станин. В таких условиях возрастает интерес к альтернативам, таким как полимербетон, железобетон, гранит. Эти материалы в общем случае не могут заменить традиционные чугунные изделия, но в частных — крайне эффективны.

Разработанные швейцарскими машиностроителями в восьмидесятых годах 20 века полимербетонные станины нашли применение в станках повышенной точности. Полимербетон является композитом на основе смол и наполнителей. Обычно используют эпоксидные и полиэфирные смолы. Наполнители —

кварцевый песок, гранитный щебень, фарфоровые шарики и т.п. Возможны армирование станины.

Главное достоинство материала — отличные характеристики виброгашения. Полимерные композиты снижают вибрацию в 10 раз лучше чем чугун и в 45 раз лучше чем сталь. Прочностные характеристики некоторых композиций приближаются к чугуну, но в целом механические характеристики полимербетонных составов от соответствующих параметров чугуна не более 50 %.

Недостатками полимербетона в первую очередь является низкая температурная стойкость и относительно сложная технология получения качественных отливок. С температуры 70° С начинают терять свойства материалы на основе эпоксидных смол, со 140 °С — на основе полиэфирных. Но все-таки главные проблемы в технологии заливки. Тепловыделение, газовыделение, усадка при затвердевании, разный коэффициент теплового расширения арматуры и матрицы затрудняют получение качественных отливок. При получении качественных отливок обязательно применение вакуумных технологий и строгое соблюдение температурного режима.

Дополнительно нужно отметить высокую стоимость. Смолы в среднем стоят около 270 руб/кг, а импортные аналоги дороже в 2–3 раза. По сравнению с железобетоном полимербетон дороже почти на порядок и мало отличается от чугуна.

Железобетонные конструктивные элементы применяют достаточно давно и успешно при производстве крупногабаритных станков. Железобетон относительно технологичен, дешев, экологичен, доступен. Его удобно армировать, т.к. коэффициент теплового расширения стали и бетона отличаются незначительно. В последнее время при изготовлении бетонных конструкций успешно применяют арматуру из композиционных материалов. Механическая прочность качественного железобетона на сжатие практически равна прочности чугуна и выше чем у полимербетона. Вибрации он поглощает лучше чугуна хотя и хуже полимербетона.

Недостатками бетона является незначительная прочность при растяжении, возможность коррозии, изменение свойств во времени. Эти недостатки частично можно минимизировать за счет состава, правильного армирования, а также технологии заливки.

В случае перехода на названные выше конструкционные материалы, проектирование

стантин приобретает новое содержание. Это не только расчеты, связанные с оценкой прочности и жесткости конструкции, имеющие свою специфику, нехарактерную для станкостроения. Нужно решать задачи рационального размещения и закрепления закладных элементов с учетом необходимой дальнейшей чистой обработки присоединительных поверхностей.

В рамках проекта разработки и изготовления малогабаритного шлифовально-заточного станка с ЧПУ (5 управляемых координат) была опробована технология получения железобетонной станины (базовой плиты). Для снижения влияния органических недостатков железобетона были приняты ряд мер, в первую очередь, по оптимизации состава и технологии укладки. Деформации и разрушение материала, связанные с гигроскопичностью и наличием воды, решались двумя путями.

Во-первых, состав смеси был выполнен при минимально допустимом водоцементном соотношении — 0,3, а для улучшения удобоукладываемости был использован суперпластификатор и ускоритель набора прочности «Реламикс М-2». Это обеспечило качество бетона, существенно снизило пористость и гигроскопичность. Песок и щебень были тщательно промыты для удаления пылевых фракций, прокалены с целью точной оценки воды в бетоне. Щебень использовался двух фракций (5...10 и 15...20 мм), чтобы улучшить гранулометрический состав и повысить плотность бетона. Дополнительно для улучшения гидрофобных свойств предусмотрена окраска специальными красками.

Второй недостаток — низкая прочность на растяжение была компенсирована армированием. Использована сложная система армирования с применением отдельных линейных элементов, а также сетки. Был рассмотрен вопрос создания напряженного железобетона, разработана технология и оснастка для создания такой конструкции. Но расчеты показали, что для проектируемого станка прочность станины из железобетона достаточна даже без предварительного напряжения.

Работоспособность станины для возможных условий работы при растяжении можно повысить за счет несъемной стальной опалубки. Это решает проблемы хрупкости материала — края конструкции защищены от случайных ударов при изготовлении и эксплуатации, улучшаются и декоративные свойства изделия.

Были проработаны конструкторские и технологические вопросы, изготовлена необходимая оснастка. Опалубка выполнена в виде каркаса из листового металла. В опалубке установлена арматура, а также закладные элементы для монтажа узлов и деталей станка и транспортировки.

Арматура была закреплена резьбовыми соединениями к внешней опалубке, между собой в некоторых узлах скручены мягкой стальной проволокой. Сварочных соединений для уменьшения внутренних напряжений для крепления арматуры не применялось. Закладные элементы служат для установки рельсовых направляющих, опор ШВП, стойки, а также для ввинчивания опор и рым-болтов. Все они имеют анкерные элементы для надежного закрепления в бетоне. Между собой и с элементами арматуры они не связаны.

Были приняты меры для точного расположения закладных элементов по площади заливки. Плита отливалась на ровном основании лицевой стороной вниз. Закладные элементы точно по разметке были закреплены резьбовыми элементами на этом основании. Чтобы упростить последующую обработку привалочных плоскостей закладных элементов, они были приподняты относительно плоскости бетона. С этой целью на опорной поверхности были проложены подкладки из плотной бумаги и полиэтиленовой пленки, в местах установки закладных элементов прокладки были прорезаны. Это обеспечило выступание поверхностей, подлежащих обработке, над бетоном на 0,4 мм. Форма, подготовленная к заливке представлена на рис. 1.

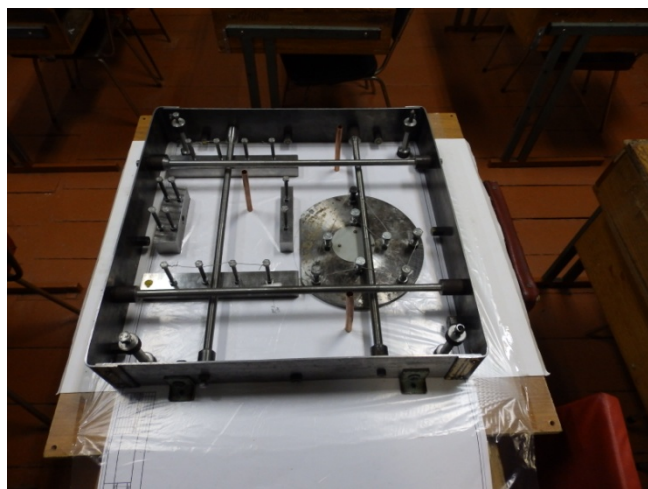


Рис. 1. Опалубка с арматурой и системой закладных элементов

С целью повышения плотности и исключения пустот в процессе изготовления отливка подвергалась вибрационному воздействию. После затвердевания бетона (28 суток) все присоединительные поверхности были пришабрены, а нерабочие поверхности обработаны специальной краской. Результат представлен на рис. 2.

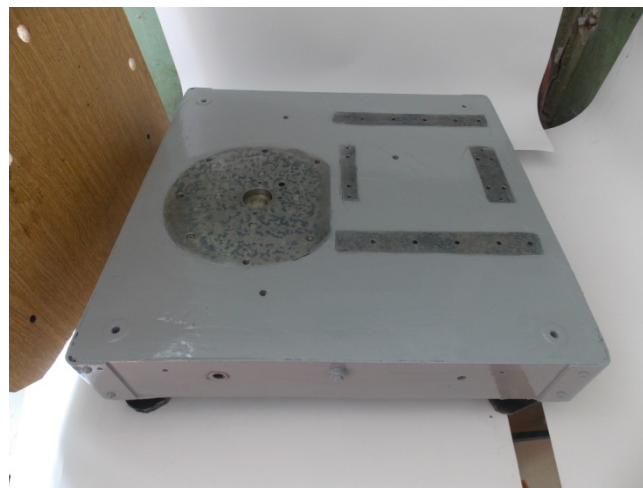


Рис. 2. Окрашенная плита с пришабренными базовыми элементами

Результаты испытаний образцов-свидетелей показали, что обеспечена прочность, превышающая прочность бетона марки 500, материал практически лишен пор.

Изменения появляются и в составе проектных расчетов. Снижается потребность в расчетах передаточных механизмов, частично несущей системы, которые приобретаются в виде готовых конструктивных решений с заранее заданными характеристиками. При этом резко возрастает роль расчетов размерных цепей, в том числе пространственных и с учетом контактных деформаций.

Из работ Д.Н. Решетова, Э.В. Рыжова, А.Г. Сулова известно, что даже для традиционных станков контактные деформации составляют от 40 до 90 % от общих перемещений их узлов. Для модульных конструкций число стыков резко возрастает. В связи с этим важность проблемы обеспечения контактной жесткости также растет. Проявляется эта проблема двояко. Необходимо как правильное регламентирование технических требований к материалу стыков, размерам и качеству поверхностного слоя, так и технологические решения по обеспечению заданных характеристик стыка. Еще более интересным было бы одноступенчатое решение задачи: определение условий обработки, обеспечивающих требуемую величину контактных деформаций.

Необходимо отметить актуальность расчетов контактной жесткости не только для оценки эксплуатационных характеристик станка. Оценка контактных перемещений нужна для определения некоторых исполнительных размеров. Характерный пример представлен на рис. 3, где упрощенно показана часть конструкции одной из линейных координат станка.

На плоскости станины 1 монтируются проставки 2 под рельсовые направляющие 3 (правая рельсовая направляющая на рисунке не показана) и подшипниковые опоры для винта ШВП 4. По рельсовым направляющим движутся каретки рельсовых направляющих 5. Стол 6 устанавливается на плоскости кареток и корпуса гайки ШВП 7.

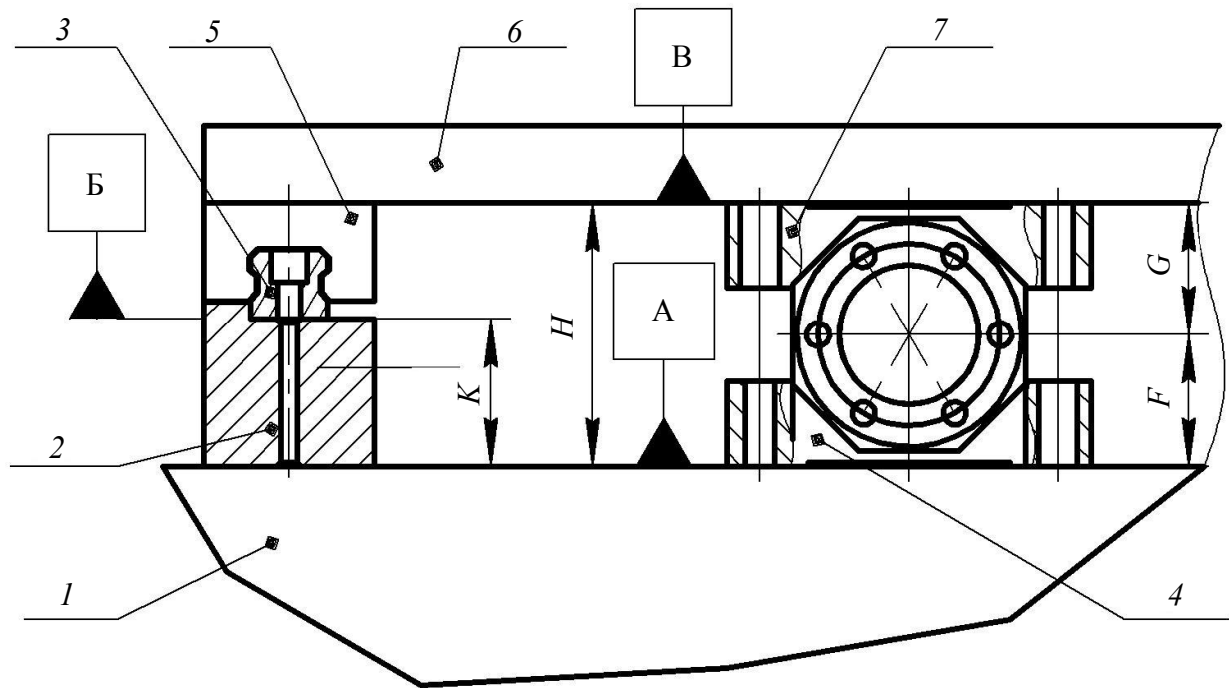


Рис. 3. Схема размерной цепи для расчета размеров с учетом контактных деформаций

При этом плоскости комплекта кареток (в комплекте не менее двух, чаще четырех, возможно и более) и корпуса гайки ШВП должны точно совпадать, чтобы обеспечить нормальный контакт с опорной плоскостью стола. Одновременно нужна параллельность рельсовых направляющих и оси ШВП. Возникает сложная пространственная размерная цепь. Если пренебречь постоянством размера K — высотой опорной поверхности левой и правой проставок под рельсы, угловой погрешностью их расположения в горизонтальной плоскости то задачу можно упростить перенеся на плоскость. Замыкающим размером для данной схемы в первом приближении можно считать размер G от оси корпуса гайки ШВП до привалочной плоскости.

Затяжка стыков «проставка – станина», «опора подшипника ШВП – станина», «рельс – проставка», «каретка – стол», «корпус гайки ШВП – стол» создает контактные перемеще-

ния, которые должны быть учтены при назначении размера G . Эксперименты показали, что первое нагружение стыка «рельс – прищабренная проставка» дает контактные деформации до 0,03 мм, повторные – от 0,01 до 0,017 мм. Один из способов расчета размера для такой схемы рассмотрен в [2].

Наличие в размерной цепи более 10 стыков, работающих параллельно-последовательно, приведет к значительным погрешностям, если не принять меры по минимизации и стабилизации контактных деформаций. Поэтому технологическое обеспечение качества в этой ситуации имеет важное значение. Для стабилизации деформации необходимо как постоянное значение крутящего момента затяжки крепежных винтов, так и минимальный разброс параметров качества поверхностного слоя сопрягаемых поверхностей. Эксперименты показали, что колебание величины крутящего момента, прилагаемого к головке винта

более чем на 25 %, приводит к значимому изменению соответствующих контактных деформаций.

Шероховатость стыков мала, но ее обеспечение обычно не создает проблем — современные шлифовальные станки легко обеспечивают этот параметр. Больше проблем создают волнистость и макроотклонения. Даже очень аккуратное многократное шлифование не гарантирует отсутствия волнистости, крат-но превышающей шероховатость.

Макроотклонения связаны в основном с наличием внутренних остаточных напряжений. Причем, они могут присутствовать даже у покупных изделий производителей с хорошей репутацией. Изделия эти нежесткие, термообработаны. При этом любые нарушения в технологии термической и (или) механической обработки приводят к наличию нестабильных структур, которые будут распадаться, что сопровождается появлением макроотклонений. Поэтому для значительного круга станочного оборудования сегодня невозможно отказаться от операций по ручной пригонке (шабрение, притирка) отдельных стыков.

Важную роль в обеспечении точности станков играет принятая модель управления станком. Современные системы ЧПУ позволяют существенно снизить требования к точности механической системы. Алгоритмы повышения точности, применяемые на координатно-измерительных машинах, все чаще применяют в металлорежущих станках. Один из вариантов, заключающийся в сканировании зоны обработки, сравнении показания датчиков линейных перемещений с теоретическими значениями и внесением корректирующих перемещений, относительно просто реализуется на металлорежущем оборудовании [2, 3].

Подводя итоги, можно сказать, что сегодня, благодаря доступности станочных модулей различных типоразмеров и характеристик, расширились возможности новых, в том числе малых предприятий по разработке и изготовлению металлорежущих станков. Однако это

направление работ пока не в полной мере обеспечено с научно-методической точки зрения. Не в полной мере используются нетрадиционные материалы и технологии. Тем не менее, по мере решения этих задач, указанное направление будет развиваться, вероятнее всего это развитие будет опережать традиционно сложившиеся подходы.

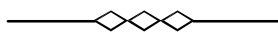
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Польский, Е.А., Филькин, Д.М. Модель комплексного анализа размерных связей для обеспечения точности сборочных соединений // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – №5/277 (576). – С. 59–66.
2. Петрешин, Д.И., Федонин, О.Н., Федоров, В.П., Хандожко, А.В., Хандожко, В.А. Расширение функциональных возможностей металлорежущих станков с ЧПУ путем организации связи между ПЭВМ и УЧПУ при построении адаптивной системы управления // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – С. 4–9.
3. Федонин, О.Н., Петрешин, Д.И., Хандожко, В.А., Агеенко, А.В. Повышение точности токарных станков с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 5(11). – С. 36–43.

REFERENCES

1. Polsky, E.A., Filkin, D.M. Model of complex analysis of dimensions ties for accuracy ensuring in assembly units // Proceedings of OrelSTU. Set “Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology”. – 2009. – №5/277 (576). – pp. 59–66.
2. Petreshin, D.I., Fedonin, O.N., Fyodorov, V.P., Khandozhko, A.V., Khandozhko, V.A. Functional potentialities expansion in NC machine-tools through organization of ties between PCs and NCD at formation of control adaptive system // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2011. – № 4. – pp. 4–9.
3. Fedonin, O.N., Petreshin, D.I., Khandozhko, V.A., Ageyenko, A.V. Accuracy increase in NC lathes // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – № 5(11). – pp. 36–43.

Рецензент д.т.н. Б.М. Бржозовский



УДК 621.923
DOI: 10.12737/21425

С.М. Братан, д.т.н.,
В.Б. Богуцкий, к.т.н.,
А.Г. Колесов, аспирант
(Севастопольский государственный университет,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)
E-mail: serg.bratan@gmail.com

Математическое моделирование процесса доводки прецизионных поверхностей упругих пластин с поверхностно-активными веществами

Представлено математическое описание химико-механического процесса доводки с поверхностно-активными веществами. Предложенные модели позволяют рассчитывать съем материала с учетом образования тончайших оксидных пленок на обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: доводка; абразивные зерна; вероятность удаления материала; поверхностно-активные вещества.

S.M. Bratan, D.Eng.,
V.B. Bogutsky, Can.Eng.,
A.G. Kolesov, Post graduate student
(Sevastopol State University,
33, Universitetskaya Str, 299053 Sevastopol)

Mathematical modeling of high-precision surfaces finishing in elastic plates with surface-active matters

At present a significant problem at the production of high-precision machinery and devices is the ensuring of stability of quality specified parameters and increase of working productivity. The simultaneous achievement of these values may be obtained only at the expense of the destination of optimum modes and methods of manufacturing operations control for that there were necessary adequate mathematical models. The existing engineering processes are formed on determined procedures without taking into account a stochastic nature of a process and the interference of chemical and mechanical phenomena in the area of working. In the paper the mechanism of allowance removal at finishing with abrasive pastes having in their composition as fillers the surface-active matters as a factor defining the effectiveness of a finishing procedure is investigated. A process mathematical model is developed allowing the computation of material removal at any time at different algorithms of modes changes including parameters of a contact area, a current state of a surface layer in a blank. A model formed taking into account the process of passivation, machine cutting, takes into account a stochastic character of a process and allows estimating differentially the impact of separate factors upon material removal.

Keywords: abrasive grains; likelihood of material removal; surface-active materials.

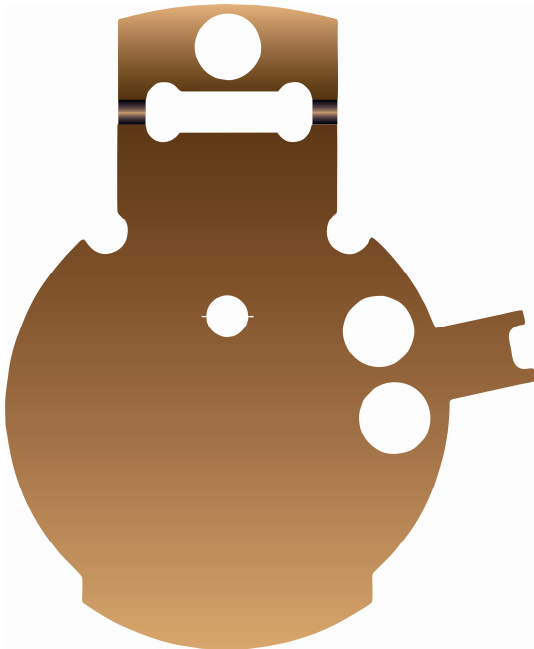
В настоящее время актуальной научно-технической задачей является создание малогабаритных высокоточных приборов, используемых в системах управления авиационной, космической и морской техники, а также целого спектра объектов специального назначения.

При создании таких приборов существенно повышаются требования к точности, надежности, габаритно-массовым харак-

теристикам и др. В качестве чувствительного элемента используются прецизионные упругие пластины, разработкой и исследованием которых занимаются как зарубежные фирмы, например, Northrop Grumman (США), Marconi (Великобритания), InnaLabs (Великобритания), Badin-Crouzet (Франция), так и российские РПКБ, НПП "Медикон", ОАО "АНПП "ТЕМП-АВИА" и др.

В качестве примера таких конструкций рассмотрим подвесы маятников акселерометров (рис.1), представляющих собой объект, выполненный в виде пластины с фасонными поверхностями, изготовленными по 4–5-му

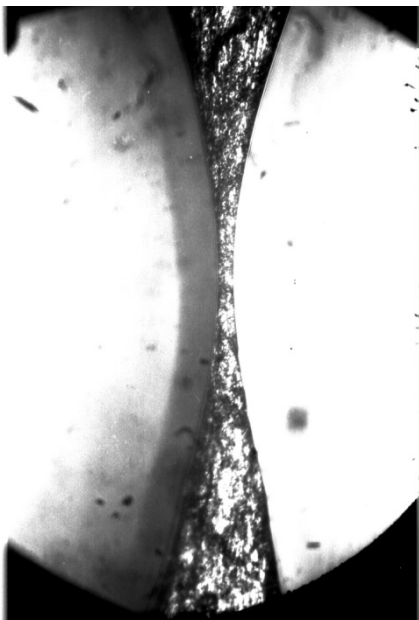
квалитетам точности. Традиционно для обработки таких деталей используются методы абразивно-алмазной обработки, к числу которых относится процесс доводки абразивно-алмазными пастами.



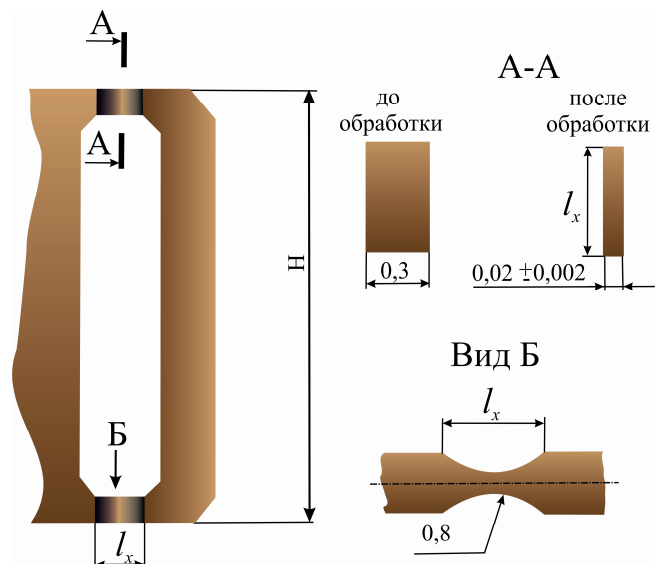
а)



б)



в)



з)

Рис. 1. Пример конструкций маятников:

а, б – конструкции маятников; в – перемычка; з – схема с допусками на изготовление (перемычка толщиной 0,020 мм с допуском $\pm 0,002$ мм и шероховатостью $Ra = 0,1 \dots 0,05$ мкм)

Доводка является разновидностью химико-механической обработки – снятие материала происходит в результате разрушения выступающих микронеровностей под механическим воздействием в химически активных средах с абразивной суспензией. В процессе доводки происходит механическое сглаживание выступающих микронеровностей, при этом возникает адсорбционный эффект понижения прочности (эффект Ребиндера). Вследствие разности скоростей движения поверхностей заготовки и притира, пассивирующая пленка, покрывающая обрабатываемую поверхность, срезается, а в выступающих активированных местах обнажившейся поверхности под влиянием химически активной среды (ПАВ), мгновенно появляется новая [1].

В настоящее время процесс доводки превращается в длительные многоступенчатые процедуры, требует высокого индивидуального мастерства работников, при этом стабильность качества готовых деталей составляет 13...15 % от общего количества обработанных изделий при трудоемкости операций 10...20 мин на одну деталь.

Требования современного рынка, с одной стороны, вынуждают предприятия увеличивать производительности обработки, а с другой – выдерживать стабильность заданных показателей качества. Одновременное достижение этих показателей может быть обеспечено только за счет назначения оптимальных режимов и методов управления технологическими операциями, для чего необходимы адекватные математические модели.

Существующие технологические процессы построены на детерминированных методиках, не учитывающих стохастическую природу процесса и взаимовлияние химических и механических явлений в зоне обработки. Что сдерживает внедрение процесса доводки в производство [2].

Таким образом, целью данной работы является разработка математических моделей, отражающих закономерности удаления материала на операциях доводки с поверхностно-активными веществами (ПАВ).

При прохождении абразивных зерен через фиксированный уровень y на обрабатываемой поверхности образуются элементарные площадки. Если известно число площадок ΔN , возникающих в любой момент времени, то можно вычислить приращение химико-механического съема материала с учетом обновления поверхности в результате абразивно-

го воздействия:

$$\Delta Q_{\text{хм}} = [\Delta Q(\tau') \Delta N(\tau')] \Delta t, \quad (1)$$

где $\Delta Q(\tau')$ – скорость образования пассивирующей пленки; $\Delta N(\tau')$ – число площадок; Δt – приращение времени.

Скорость пассивации:

$$\Delta Q(\tau') = \exp[-\alpha(t-\tau)]x, \quad (2)$$

где x – скорость образования пленки без ПАВ, $x = \text{const}$ (для данного материала);

α – коэффициент пассивации.

Следовательно, единственным неизвестным остается число площадок ΔN , возникающих в любой момент времени.

Для получения зависимости, позволяющей рассчитывать число площадок, возникающих в любой момент времени, рассмотрим рис. 2.

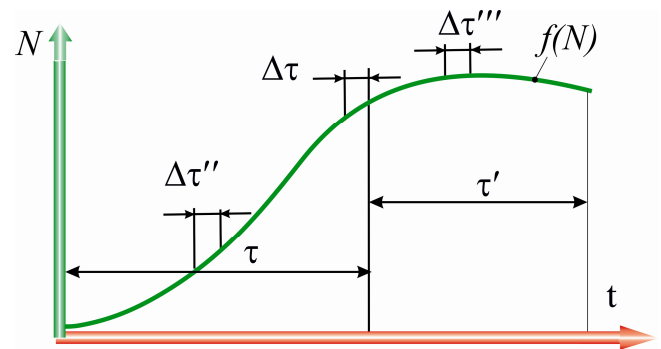


Рис. 2. Схема к расчету химико-механического съема материала с учетом обновления поверхности в результате абразивного воздействия

Пусть в момент времени t_0 через рассматриваемый уровень заготовки начинают проходить вершины наиболее выступающих абразивных зерен.

В случае контактирования абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью на ней появляются элементарные площадки. Однако существует вероятность полного или частичного наложения площадок, т.е. у большинства зерен контакт с материалом будет не полным. Он распространяется не на всю ширину абразивного зерна. Другая часть зерен вообще попадает в единичные риски, следовательно, площадки не образуются.

Из анализа работы единичного зерна при абразивной обработке следует, что проходя зону контакта заготовки с инструментом, оно может срезать материал, если попадает на

один из выступов шероховатости поверхности, или не срезать его, если попадет в одну из впадин шероховатости. При встрече зерна с выступом увеличивается доля удаленной части материала. Если зерно попадает во впадину, то материал не снимается, но вероятность его удаления потенциально увеличивается, так как повышается вероятность попадания на выступ последующих абразивных зерен.

Вероятность контакта вершины абразивного зерна с материалом численно равна вероятности удаления материала [3]. При любом положении зерна в зоне резания она будет определяться соотношением не удаленной части металла $\sum_{i=1}^n l_i$ к общей длине рассматриваемого участка l (рис. 3):

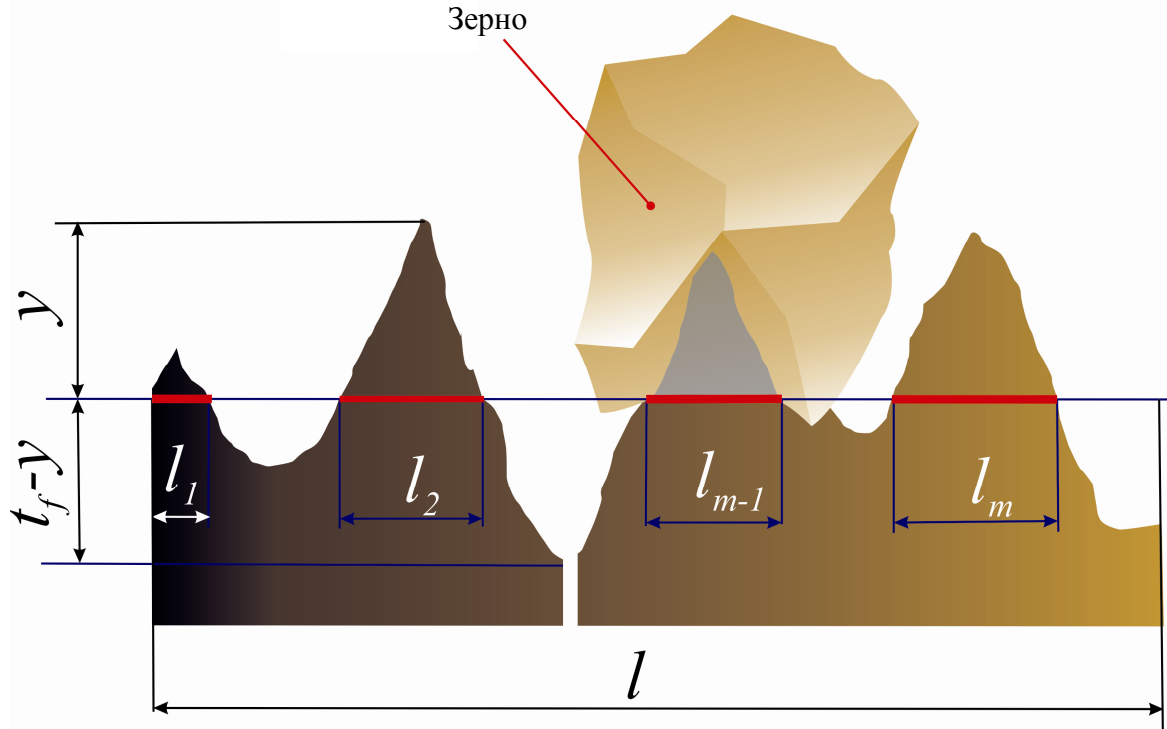


Рис. 3. Схема к расчету вероятности контакта

$$P_k = \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l} = 1 - P(M) = \exp(-u_0 - u), \quad (3)$$

где u_0 – показатель степени при e , характеризующий состояние поверхности в данном сечении до его входа в зону резания; u – показатель степени при e , характеризующий изменение вероятности съема металла в зоне резания; $P(M)$ – вероятность удаления материала.

Не выясняя физическую природу показателей u_0 и u и их связь с предысторией процесса формообразования, рассмотрим изменение вероятности контакта зерен с материалом заготовки на фиксированном уровне при одном контакте поверхности с инструментом. Съем материала при доводке производится дискретными порциями, но число единичных срезов, проходящих через сечение, достаточно велико (от нескольких сотен до нескольких тысяч на единицу длины сечения), что позволяет при

расчете вероятности перейти от дискретной модели к непрерывной.

Для определения числа зерен, контактирующих с материалом, рассмотрим изменение вероятности контакта на фиксированном уровне (рис. 4). На основе анализа вероятности контакта вершин зерен с материалом может быть вычислено количество площадок, образовавшихся в момент времени τ .

Вероятность появления площадки равна вероятности события, заключающегося в том, что точка профиля зерна пройдет через материал.

Если, например, за время Δt через уровень от $a = 0$ до $a = a_g$ пройдет $\Delta \lambda$ зерен, то вероятность появления площадки будет равна:

$$P_n = \Delta \lambda P(\bar{M}), \quad (4)$$

где $P(\bar{M})$ – вероятность не удаления материала в момент времени τ на уровне u .

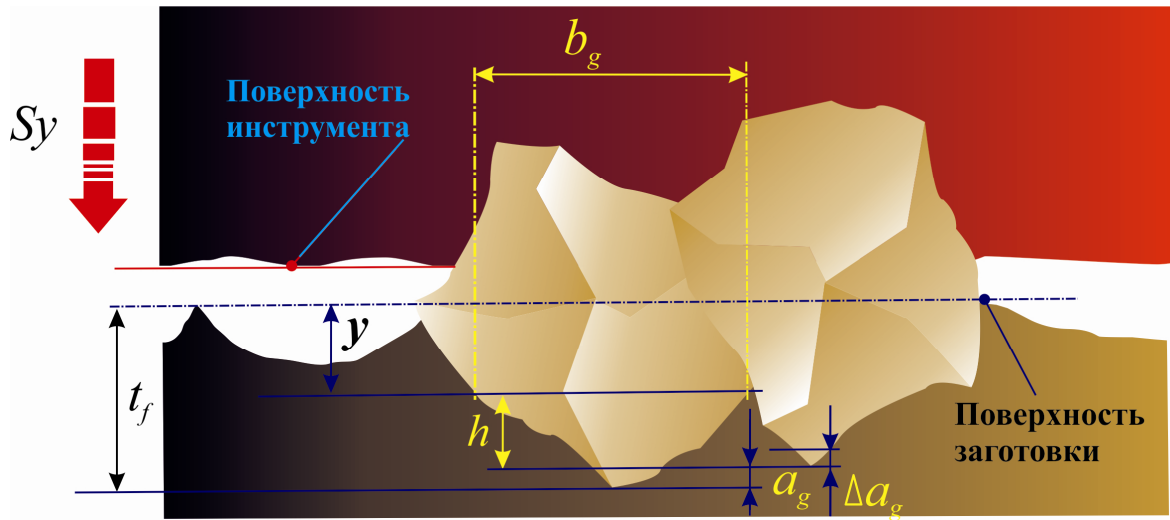


Рис. 4. Схема к расчету вероятности удаления материала заготовки

Часть площадок, образовавшихся в момент времени τ , попадает с учетом перекрытия в зону действия одного из зерен и может быть срезана в любой момент времени (см. рис. 2):

$$\tau' = t - \tau, \quad (5)$$

где t – данный момент времени; τ' – время существования площадки.

Очевидно, для того, чтобы определить число площадок в любой момент времени t , нужно умножить вероятность появления площадки P_n на вероятность события, заключающегося в том, что площадка, образовавшаяся за время Δt на уровне y , не будет срезана.

$$\Delta N(\tau') = \Delta \lambda P(\bar{M}) P_N(\bar{M}), \quad (6)$$

где $P_N(\bar{M})$ – вероятность того, что площадка не будет срезана.

Число зерен, прошедших через сечение y за время Δt , вычисляется по плотности распределения:

$$\Delta \lambda = v_u n_g f(a_g) \Delta a_g \Delta t, \quad (7)$$

где n_g – количество зерен в единице площади притира (может быть определено экспериментально, рис. 5); t_f – фактическая глубина резания; v_u – окружная скорость притира; $f(a_g)(d, L)$ – функция плотности распределения зерен по глубине [4]:

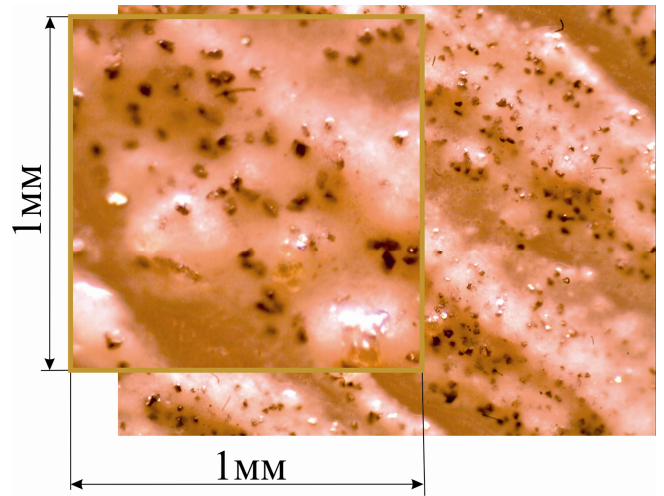


Рис. 5. Зерна на поверхности притира

$$f(a_g)(d, L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\mu}{\sqrt{\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2}} \exp \left[-\frac{[(d - u_1 - u_2) - (m_d - m_{u1} - m_{u2})]^2}{2(\sigma_{u1}^2 + \sigma_{u2}^2 + \sigma_d^2)} \right] = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{a_g}} \exp \left[-\frac{(a_g - m_{a_g})^2}{2\sigma_{a_g}^2} \right]. \quad (8)$$

На рис. 6 приведены данные численного расчета характеризующие зависимость числа зерен, прошедших через зону контакта за 30 с работы, от фактической глубины резания для доводочной пасты с алмазными зернами зернистости 14/10.

Вероятность не удаления материала на уровне y в момент времени τ :

$$P(\bar{M}) = \exp[-u(y; \tau)], \quad (9)$$

где $u(y; \tau)$ – сумма поперечных сечений зерен на уровне W за время от t_0 до τ определяется выражением:

$$u(y, \tau) = K_c b_g \lambda, \quad (10)$$

где K_c – коэффициент стружкообразования, учитывающий, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски; λ – число зерен, прошедших через единичное сечение; b_g – ширина профилей абразивных зерен.

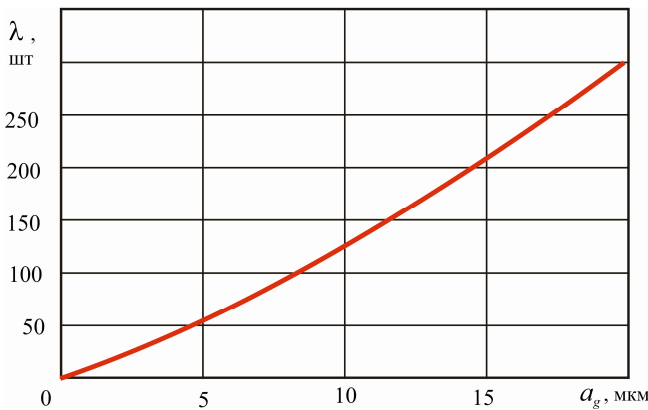


Рис. 6. Зависимость числа зерен, прошедших через сечение, от фактической глубины резания

$$P(\bar{M}) = \exp\left(-K_c v_u n_g \int_0^\tau \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau''\right). \quad (15)$$

Вероятность $P_N(\bar{M})$ того, что площадка, образовавшаяся на уровне y за время $\Delta\tau$, не будет срезана за время τ' , можно вычислить:

$$P_N(\bar{M}) = \exp[-u(\tau')] = \exp[-u(t) - u(\tau)]. \quad (16)$$

Изменение суммы поперечных сечений зерен на уровне y за время τ' определится системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_y(y, \tau) = K_c v_u n_g \int_0^\tau \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' \\ u_y(y, t) = K_c v_u n_g \int_\tau^{\tau'} \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' \end{array} \right. \quad (17)$$

Подставив (17) в (16), получим

При аппроксимации профиля зерна шаром получаем:

$$b_g = \sqrt{(a_g)(d - a_g)}. \quad (11)$$

Из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля $b_g(y)$ будут иметь зерна, вершины которых расположены в слое заготовки $l \cdot \Delta a_g \cdot \Delta\tau \cdot v_u$. Число таких вершин определяется по плотности распределения $f(a_g)(d, L)$:

$$\Delta\lambda = \left[n_g v_u \int_0^{S_y \tau''} f(a_g) da_g \right] \Delta\tau. \quad (12)$$

При подстановке (11) и (12) в (10), видно, что изменение параметра $u_y(y, \tau)$ определяется приращением суммы поперечных сечений профилей зерен:

$$\Delta u_y(y, \tau) = K_c v_u n_g b_g(y) f(a_g)(d, l) \Delta a_g \Delta\tau. \quad (13)$$

Переходя от дискретной модели к непрерывной, получим интегральное уравнение, определяющие изменение параметра вероятности в зоне контакта детали с притиром в момент времени τ на уровне y :

$$u_y(y, \tau) = K_c v_u n_g \int_0^\tau \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau''. \quad (14)$$

Следовательно, вероятность не удаления материала на уровне y в момент времени τ :

$$P_N(\bar{M}) = \exp \left[-K_c v_u n_g \left(\int_{\tau}^t \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' + \int_0^{\tau} \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' \right) \right]. \quad (18)$$

Тогда уравнение для расчета $\Delta N(\tau')$, с учетом обозначений, приведенных ранее, запишется следующим образом:

$$\Delta N(\tau') = \exp \left(-K_c v_u n_g \left[\int_{\tau}^t \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' + 2 \int_0^{\tau} \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' \right] \right) \times \left[n_g v_u \int_0^{S_y \tau'} f(a_g) da_g \right] \Delta \tau. \quad (19)$$

После подстановки (19) в (1) зависимость для расчета приращения съема металла с учетом обновления поверхности за счет абразивного воздействия запишется:

$$\Delta Q_X = \left[\begin{array}{l} \Delta Q(\tau') \exp \left(-K_c v_u n_g \left(\int_{\tau}^t \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' + 2 \int_0^{\tau} \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' \right) \right) \cdot \\ \cdot \left[n_g v_u \int_0^{S_y \tau'} f(a_g) da_g \right] \Delta \tau \end{array} \right] \Delta t. \quad (20)$$

После интегрирования по τ выражения (20) получим интегральное уравнение, описывающее съем металла при доводке с ПАВ:

$$Q_X = \int_0^t \left[\begin{array}{l} \Delta Q(\tau') \exp \left(-K_c v_u n_g \left(\int_{\tau}^t \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' + 2 \int_0^{\tau} \int_0^{S_y \tau''} b_g(y) f(a_g) da_g d\tau'' \right) \right) \cdot \\ \cdot \left[n_g v_u \int_0^{S_y \tau'} f(a_g) da_g \right] \Delta \tau \end{array} \right] d\tau. \quad (21)$$

Полученные зависимости моделируют механизм удаления материала в процессе доводки деталей абразивными пастами с поверхностно-активными веществами и могут быть использованы при расчете режимов, прогнозировании качества обработанной поверхности при доводке из условий заданного состояния поверхностного слоя детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

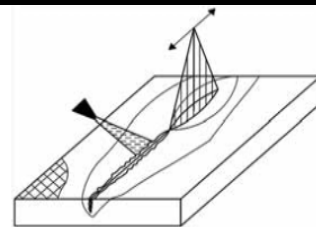
1. Zhixue Guo, Qingzhong Li, Hui Zhang, Jing Zhai. Research on material removal rate of each element of chemical mechanical polishing // *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, Vol.39, p.100. (In Chinese).
2. Братан, С.М., Сазонов, С.Е. Системный анализ процесса доводки заготовок свободным абразивом // *Резание и инструмент в технологических системах: международный научно-технический сборник*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – С. 42–48.
3. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке: монография [текст]. – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2012. – 304 с.

4. Братан, С.М., Сазонов, С.Е., Колесов, А.Г. Моделирование процессов доводки абразивными пастами // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2016. – №1 (55). – С. 25–29.

REFERENCES

1. Zhixue Guo, Qingzhong Li, Hui Zhang, Jing Zhai. Research on material removal rate of each element of chemical mechanical polishing // *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, Vol.39, p.100. (In Chinese).
2. Bratan, S.M., Sazonov, S.E. System analysis blanks finishing with free abrasive // *Cutting and Tool in Technological Systems: International Scientific-Engineering Paper Collection*. – Kharkov: KTU “KPI”, 2008. – Issue 75. – pp. 42–48.
3. Novosyolov, Yu.K. *Dynamics of Surface Shaping at Abrasion: Monograph [text]*. – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2012. – pp. 304.
4. Bratan, S.M., Sazonov, S.E., Kolesov, A.G. Modeling of finishing with abrasive pastes // *Science Intensive Technology in Mechanical Engineering*. – 2016. – №1 (55). – pp. 25–29.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов



УДК 621.375.826
DOI: 10.12737/21426

А.В. Богданов, к.т.н., **Ю.В. Голубенко**, к.т.н.,
Е.М. Тюльпанова, студент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1)
E-mail: mtbmstu@mail.ru

Особенности лазерной резки полимеров

Приведены свойства и строение полимерных материалов. Рассмотрено влияние параметров излучения на результат лазерной резки полимеров. На основе этого определены оптимальные режимы резки.

Ключевые слова: лазерная резка; лазер; полимерные материалы; полимеры.

A.V. Bogdanov, Can.Eng., **Yu.V. Golubenko**, Can.Eng.,
E.M. Tyulpanova, Student
(Bauman STU of Moscow, 5, Building 1, 2-d Baumanskaya Str., Moscow 105005)

Peculiarities in polymer laser cutting

In this paper the application of laser cutting methods for polymeric materials working is under consideration. The authors analyze the laser beam effect upon polymers reasoning from the peculiarities of their structure and properties. The methods to eliminate defects at polymer laser cutting, the methods to increase the interaction effectiveness of radiation with material, process quality are offered. To determine the dependences of a cut width and a value of flash formed at the beam input and its output of material worked there were carried out experiments at different rates and constant capacity of CO₂-laser. According the results of the researches carried out the optimum working modes were established.

Keywords: laser; polymeric materials; polymers.

Полимерные материалы, характеризующиеся разнообразными свойствами, широко применяются в современной технике. Общий объем их потребления в мире растет.

Полимерные материалы – это высокомолекулярные материалы, молекулы которых (микромолекулы) состоят из большого числа повторяющихся группировок или молекулярных звеньев, соединенных между собой химическими связями. Число звеньев характеризует степень полимеризации. Полимеры могут иметь естественное (целлюлоза, натуральный каучук) и искусственное (полиэтилен, полистирол, полиамид и др.) происхождение.

Свойства полимеров – прочность, теплоустойчивость, твердость, теплопроводность и т.д. – зависят от химического строения элементарных звеньев, размера структуры и формы макромолекул и молекулярной организации.

Наиболее распространенными полимерами являются следующие: полиолефины – полиэтилен, полиизобутилен, полипропилен, поливинил-циклогексан и др.; хлорсодержащие полимеры – поливинилхлорид (ПВХ), пенополивинилхлориды (ПВХ-1, ППС-1, ПВХЭ), полистирол (ПС), АБС-пластики; акриловые пластики – полиметилакрилат (ПММА); полиамиды (гетероцепные полимеры) – капрон,

фенилон; полиэфиры (поликонденсационные полимеры) – поликарбонаты, полиэтилен-терефталат; фторопласты – фторлоны Ф-4М, Ф-40 и др.

Методика проведения исследований

Наряду с традиционными методами обработки полимеров применяют лазерную обработку – резку [1].

При воздействии лазерного излучения на органические материалы происходят различные химические реакции деструкции, испарения, сублимации, термической диссоциации с выделением газов. В ряде случаев образуется аэрозоль в виде мелкодисперсных частиц испаренного материала.

При быстром испарении материала под воздействием лазерного излучения даже небольших плотностей мощности, порядка $10^3 \dots 10^4$ Вт/см², образуется эрозионный факел, который экранирует обрабатываемую поверхность, вызывает поглощение излучения и снижает интенсивность процесса нагрева. Конкретный уровень мощности, вызывающий экранировку, зависит от параметров излучения, свойств обрабатываемого материала и окружающей среды.

Кроме рассмотренных явлений поглощения и рассеяния при обработке полимерных материалов могут возникать искажения формы луча, тепловое расплывание, случайные смещения центра тяжести пучка излучения.

Практически при любых условиях процесс лазерной резки сопровождается формированием шероховатости поверхности, или «канавок» и «гребней», на кромках («щеках») реза. Можно наблюдать бороздки различной амплитуды и с разным расстоянием между гребнями в зависимости от используемых параметров резки.

Объяснение механизмов шероховатости (бороздок) можно дать с учетом неустойчивостей течения расплава на фронте лазерной резки. Однако общепринятой модели такого механизма пока не существует.

Одна из ранних моделей была разработана проф. Д. Шуокером [2]. В ней рассмотрены вынужденные колебания слоя расплава, поддерживаемые пульсациями давления и скорости потока режущего газа. Частотный спектр этих пульсаций находится в диапазоне от нуля до нескольких килогерц, и существуют частоты, резонансные частотам свободных колебаний слоя расплава.

Согласно моделям, рассматриваемым в

других работах [3], предполагается, что поток приводится в движение касательным напряжением от струи режущего газа. Эти модели строятся на нестационарных двухмерных уравнениях баланса массы, импульса и тепла. Этот анализ позволил получить хорошее совпадение аналитического выражения для глубины бороздок с результатами экспериментальных измерений.

Существует совершенно иная концепция механизма неустойчивости процесса лазерной резки, приводящей к образованию бороздок [4]. Основной причиной этой неустойчивости является такая особенность температурного поля, создаваемого медленно перемещающимся источником тепла, что это поле в первом приближении соответствует полю неподвижного источника.

В этом случае сканирующий лазерный пучок постоянно перекрывает и нагревает верхнюю поверхность образца, и часть этой поверхности, примыкающая к фронту реза, начинает разрушаться (плавиться, испаряться, крошиться и т.д.) раньше, чем поверхность фронта реза. Если материал нагреваемой зоны после плавления удаляется за счет продольного перепада давления в струе режущего газа, то диаметр отделяющейся капли определяется динамическим давлением потока газа, размером поля течения, на котором изменяется давление газа, и поверхностным натяжением [5].

Для устранения влияния эрозионного факела с целью повышения эффективности резки в зону взаимодействия излучения с материалом подается рабочий газ для соответствующих материалов. Первоочередное назначение этого газа заключается в удалении испарившихся частиц, плазмы и образовавшегося расплава. В ряде случаев, например, при газолазерной резке диэлектриков, поверхностный слой материала разогревается до температуры разрушения и выдувается газовой струей с последовательным разрушением слоев, что способствует увеличению скорости заглупления и резки.

Кроме того, газовая струя также защищает поверхность оптической фокусирующей системы от попадания на нее продуктов выброса из зоны резки.

При резке материалов органического происхождения следует обратить внимание на меньшую ширину реза, по сравнению с определяемой геометрией сфокусированного лазерного излучения. Это связано с образованием слоя газов из материала разрезаемого образца под действием лазерного излучения.

Этот слой газов смешивается с газом (воздухом), продуваемым из сопла резака, и образует раскаленную газовую струю, прорезающую в дальнейшем материал в глубину.

Качество и производительность резки неметаллов в значительной степени определяются сочетанием параметров лазерного излучения и газового сопла.

Качество процесса лазерной резки полимеров определяется состоянием кромки реза. Состояние кромки реза зависит от скорости резки, давления газовой струи. Экспериментальные исследования проводились на полимере марки АПЭТ – аморфный полиэтилентерефталат.

Исследования проводились с целью выявления характера зависимости ширины реза от скорости лазерной резки и от давления воздуха в резаке при различных направлениях движения резака. Вырезаемый образец имел форму восьмиугольника (рис. 1).

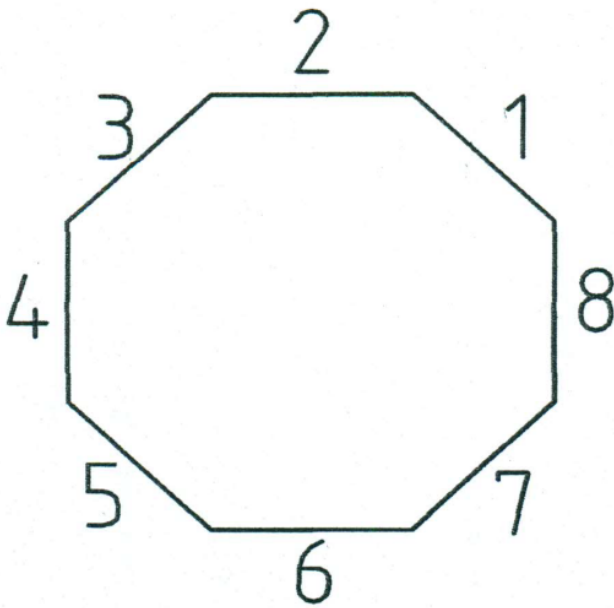


Рис. 1. Экспериментальный образец:
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – порядковые номера сторон резов

Эксперименты проводились на отпаяном CO₂-лазере: мощность 150 Вт; выходная апертура – 7 мм; состав излучения – одномодовый; расходимость луча – 0,003 рад; фокусное расстояние линзы – 100 мм; диаметр пятна в фокусе – 0,3 мм; толщина обрабатываемого материала – 6 мм.

Эксперименты для выявления зависимости ширины реза и образуемого грата на входе и выходе от скорости резания проводились при постоянной мощности $P = 80$ Вт.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты исследований представлены на рис. 2 – 4, графиках (рис. 5) и табл. 1 – 3.

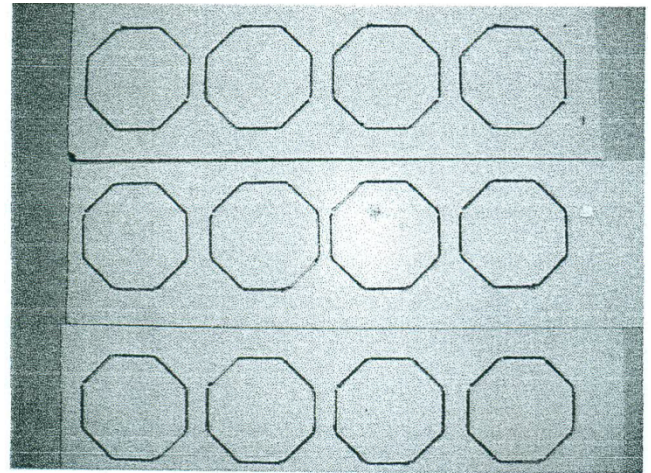


Рис. 2. Лицевая поверхность

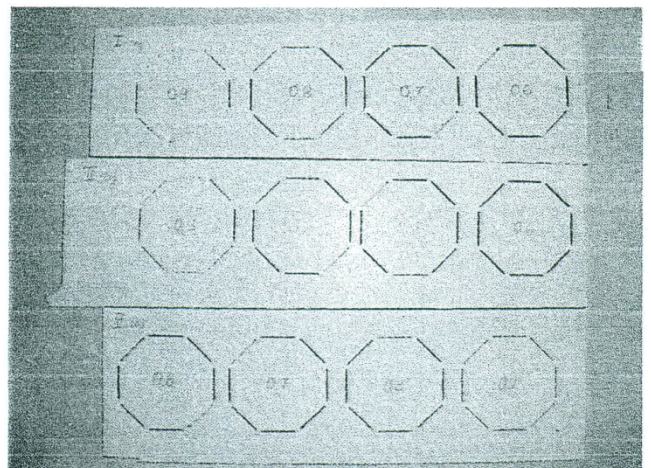


Рис. 3. Изнаночная поверхность

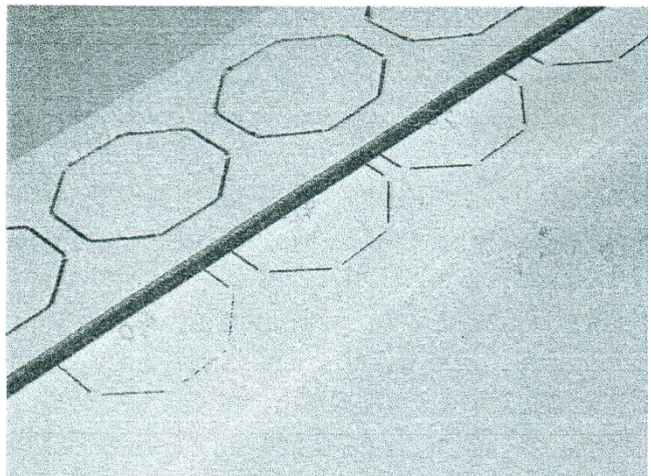


Рис. 4. Сравнение поверхностей реза (сверху – лазерный рез, продукты распада делают рез темным, при необходимости отмываются водой)

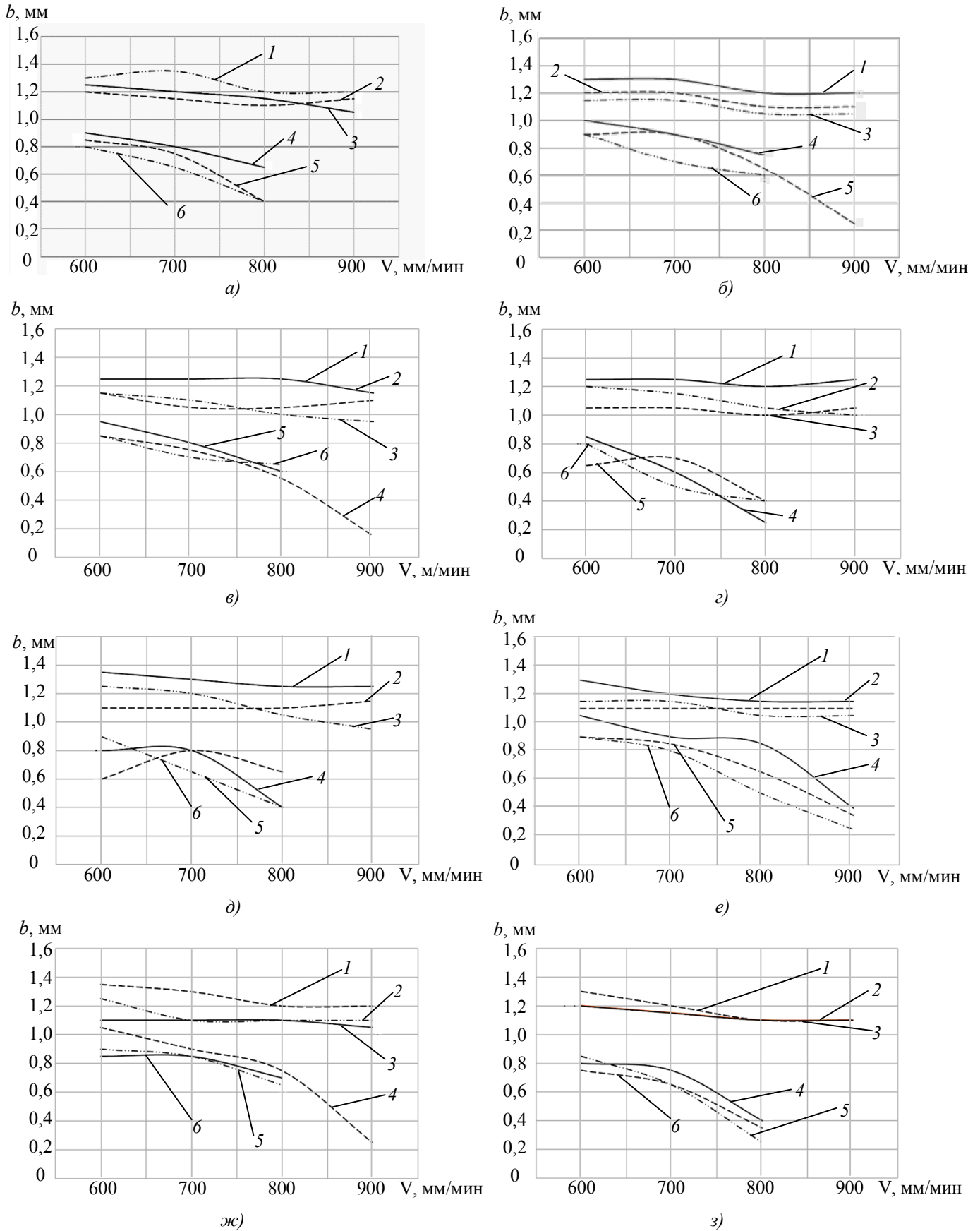


Рис. 5. Зависимость ширины реза от давления и скорости на стороне: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6; ж – 7; з – 8 (графики 1, 2, 3 – лицевая сторона образца; 4, 5, 6 – изнаночная сторона)

1. Максимальное давление газа

Скорость резки, мм/мин	Ширина реза на лицевой стороне восьмигранника, мм								Ширина реза на изнаночной стороне восьмигранника, мм							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
600	1,3	1,3	1,25	1,25	1,35	1,3	1,35	1,3	0,9	1	0,95	0,85	0,8	1,05	1,05	0,8
700	1,35	1,3	1,25	1,25	1,3	1,2	1,3	1,2	0,8	0,9	0,8	0,6	0,8	0,9	0,9	0,75
800	1,2	1,2	1,25	1,2	1,25	1,15	1,2	1,1	0,65	0,75	0,6	0,25	0,4	0,85	0,75	0,4
900	1,2	1,2	1,15	1,25	1,25	1,15	1,2	1,1	непрорез				0,4	0,25	непрорез	

2. Среднее давление газа

Скорость резки, мм/мин	Ширина реза на лицевой стороне восьмигранника, мм								Ширина реза на изнаночной стороне восьмигранника, мм								
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
600	1,2	1,2	1,15	1,05	1,1	1,1	1,1	1,2	0,85	0,9	0,85	0,65	0,6	0,9	0,9	0,85	
700	1,15	1,2	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1	1,15	0,75	0,9	0,75	0,7	0,8	0,8	0,85	0,65	
800	1,1	1,1	1,05	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	0,4	0,65	0,55	0,4	0,65	0,5	0,65	0,25	
900	1,15	1,1	1,1	1,05	1,15	1,1	1,05	1,1	непрорез		0,25	0,15	непрорез		0,25	непрорез	

3. Минимальное давление газа

Скорость резки, мм/мин	Ширина реза на лицевой стороне восьмигранника, мм								Ширина реза на изнаночной стороне восьмигранника, мм							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
600	1,25	1,15	1,15	1,2	1,25	1,15	1,25	1,2	0,8	0,9	0,85	0,8	0,9	0,9	0,85	0,75
700	1,2	1,15	1,1	1,15	1,2	1,15	1,1	1,15	0,65	0,7	0,7	0,5	0,65	0,85	0,85	0,65
800	1,15	1,05	1,0	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	0,4	0,6	0,65	0,4	0,4	0,65	0,7	0,35
900	1,05	1,05	0,95	1,0	0,95	1,05	1,1	1,1	непрорез				0,35	непрорез		

4. Резка лазером с односторонним излучателем

Скорость резки, мм/мин	Ширина реза на лицевой стороне восьмигранника, мкм								Ширина реза на изнаночной стороне восьмигранника, мкм							
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
400	650	600	750	700	650	550	550	550	750	550	850	650	650	550	600	650
600	600	600	650	700	600	550	500	550	400	300	350	500	350	300	350	250
800	550	550	600	650	600	500	500	550	280	250	270	250	280	300	230	220
1000	550	400	550	600	550	500	500	500	непрорез							

Выводы

В результате проведенных исследований и анализа экспериментов, взятых из компетентных источников, было установлено, что на экспериментальной установке с мощностью 150 Вт оптимальными режимами обработки являются: скорость резки – 650...700 мм/мин; давление воздуха в резке – 0,25 МПа.

Для одномодового лазера мощностью 150 Вт, исходя из анализа экспериментов, оптимальной является скорость 650 мм/мин. Чтобы определить оптимальное давление воздуха в резке в этом случае, нужно провести ряд экспериментов, и, зная оптимальное значение скорости, это сделать достаточно просто.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубенко, Ю.В., Бондарев, А.В., Пономаренко, К.В. Лазерная резка полимеров и неметаллических композиционных материалов // Технология машиностроения. – 2005. – № 10. – С. 57–59.
2. D. Schuocker, Ind. Las. Handbook, Ed.D. Belforte D.M. Levitt, Penwell, Tulsu, OK, 1987. pp. 65–79.

3. P. Sforza, V. Santecesaria. Proc. SPLE 2207, 1994. pp.836–847.

4. Макашов, Н.К., Асмолов, Е.С., Блинов, В.В. // Квантовая электроника. – 1992. – №9. – С. 910–915.

5. Коваленко, В.С., Романенко, В.В., Олещук, Л.М. Безотходные процессы лазерной резки. – Киев: Техника, 1987.

REFERENCES

1. Golubenko, Yu.V., Bondarev, A.V., Ponomarenko, K.V. Laser cutting of polymers and nonmetallic composites // *Engineering Techniques*. – 2005. – № 10. – pp. 57–59.

2. D. Schuocker, Ind. Las. Handbook, Ed.D. Belforte D.M. Levitt, Penwell, Tulsu, OK, 1987. pp. 65–79.

3. P. Sforza, V. Santecesaria. Proc. SPLE 2207, 1994. pp.836–847.

4. Makashov, N.K., Asmolov, E.S., Blinov, V.V. // *Quantum Electronics*. – 1992. – №9. – pp. 910–915.

5. Kovalenko, V.S., Romanenko, V.V., Oleshchuk, L.M. *Nonwaste Processes of Laser Cutting*. – Kiev: Equipment, 1987.

Рецензент д.т.н. И.И. Васильцов

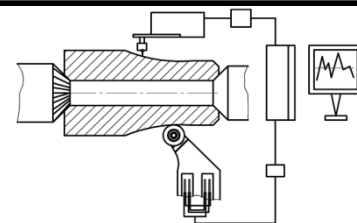
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru



УДК 621.75
DOI: 10.12737/21427

Е.А. Польский, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет)
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 71
E-mail: polski.eugene@hotmail.com

Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей

Изложены основные положения технологического обеспечения точности и качества поверхностей деталей машин на основных этапах жизненного цикла изделия при разработке технологии механической обработки методом автоматизированного генеративного синтеза единичных маршрутных процессов изготовления.

Ключевые слова: метод генерации технологических процессов; распознавание поверхностей; технологичность изделий; размерный анализ.

E.A. Polsky, Can.Eng.
(Bryansk State Technical University)
7, 50 Years of October Avenue, 241035)

Technological support of accuracy and quality of machinery surfaces at designing of route-operation engineering process by synthesis method based on dimensions ties analysis

Basic regulations for technological support of accuracy and quality of machinery surfaces at the basic stages of a product life cycle at the development of machining techniques by a method of automated generative synthesis of single route processes of manufacturing are presented.

Keywords: method of engineering processes generation; surface recognition; product manufacturability; measuring analysis.

Качество продукции закладывается на первых этапах жизненного цикла: при проектировании; при решении вопроса по обеспечению эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений; при технологической подготовке производства, с выбором стратегии обработки элементарной поверхности для достижения параметров качества поверхностного слоя де-

тали, обеспечивающих ее установленную долговечность; и сборке, при которой происходит контактирование поверхностей деталей и осуществляется их действительное взаимное расположение [1].

Подготовка производства в современных условиях не может осуществляться без использования средств автоматизации и систем

автоматизированного производства (CAD/CAM/CAE-систем). Однако отдельное использование этих средств не дает желаемого результата, а иногда создает еще и дополнительные препятствия. В настоящее время вопросы технологической подготовки могут быть решены на качественно новом уровне с использованием интегрированных САПР. Применение этих систем должно быть неразрывно связано с CALS-технологиями – современными технологиями информационной интеграции процессов, выполняющихся в ходе всего жизненного цикла продукции и ее компонентов.

Генеративный подход к разработке технологии подразумевает автоматический синтез стратегии обработки на основании геометрической конфигурации и технических требований, предъявляемых к детали, с указанием сведений о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках контроля изделия. При этом создаются предпосылки к реализации принципа одноступенчатого проектирования – технологическое обеспечение требуемых параметров долговечности изделия при проектировании конструкции и разработке чертежей деталей на основе анализа размерных связей, включающего расчет технологически обоснованных значений конструкторских размеров с учетом их изменения в процессе эксплуатации для повышения надежности функциональных показателей машин.

Принцип одноступенчатого проектирования для обеспечения точности конструкций предполагает управление точностью непосредственно элементами разрабатываемых технологических процессов изготовления и сборки. Это особенно актуально на опытном производстве при подготовке к выпуску новых изделий, а также в мелкосерийном и единичном производстве, так как в этом случае обычно не разрабатывается весь комплекс документации, предусмотренный стандартами разработки и постановки продукции на производство, а сама разработка проектов осуществляется силами нескольких специалистов.

Структуру конструкторско-технологической модели (КТМ) формообразования детали $Q_{КТ}$, можно представить следующим образом [2]:

$$Q_{КТ} = \langle Z, M_{КТ}, C_{КТ}, S \rangle; \quad (1)$$

где $Z = \langle Z_1 \dots Z_n \rangle$ – данные для идентификации детали и общие сведения о ней;

$M_{КТ} = \langle \mathcal{E}_{КТ}, O_{КТ} \rangle$ – структурный состав детали; $\mathcal{E}_{КТ}$ – множество конструкторско-технологических элементов (КТЭ); $O_{КТ}$ – множество отношений над ними; $C_{КТ} = \langle \mathcal{E}_{КТ}, I \rangle$ – множество схем обработки конструкторско-технологического элемента; $I = \langle I_1 \dots I_n \rangle$ – данные об инструменте, реализующем i -ю схему обработки; $S = \langle B_C, D_C \rangle$ – структурный состав станка; B_C – множество блоков станка; D_C – множество движений блоков станка.

В отличие от обобщенной КТМ, в данном определении отсутствуют основные технологические базы. Предполагается, что их определение является одной из функций САПР ТП. Кроме того, используется единственный уровень расчленения детали.

На основе 2D и 3D модели детали КТЭ можно представить в виде следующего кортежа данных:

$$\mathcal{E}_{КТ} = \langle P, (\mathcal{E}_{3D}, \mathcal{E}_q, O), C \rangle, \quad (2)$$

где $P = \langle P_1 \dots P_m \rangle$ – параметры, описывающие КТЭ; \mathcal{E}_{3D} – множество элементов трехмерного представления КТЭ; \mathcal{E}_q – множество элементов двумерного представления КТЭ; O – множество отношений над ними; C – множество ограничений на параметры и структуру КТЭ.

К параметрам КТЭ относятся: геометрические размеры, система координат КТЭ, параметры шероховатости основных поверхностей, параметры точности, вид термообработки, механические свойства, вид поверхностного покрытия.

Некоторые из перечисленных параметров имеют нечеткую природу. Так, например, коническая поверхность, присутствующая в модели, может интерпретироваться и как КТЭ фаски, и как КТЭ коническая ступень вала. При этом различие между ними можно выразить так – протяженность фаски много меньше, чем ступени вала, кроме того, параметры точности и шероховатости исполнения фаски, как правило, не высоки в отличие от ступени и лежат в нечетко определенном интервале.

Представленное в данной работе математическое обоснование процедуры распознавания КТЭ, подразумевает автоматическое формирование КТЭ существующей 3D модели детали, без участия человека. Непосредственная реализация описанной здесь математической

модели на данном этапе исследования может быть затруднена.

Геометрическую модель (ГМ) детали Q_G можно описать:

$$Q_G = \langle \mathcal{E}_G, O_G \rangle, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_G – множество геометрических элементов; O_G – множество отношений над ними.

Тогда задачу декомпозиции ГМ на КТЭ можно сформулировать следующим образом: определить все возможные подмножества Q_G , определяемые зависимостью (3) и удовлетворяющие ограничениям C .

Рассмотрим КТЭ фаска и КТЭ коническая ступень (рис. 1). Как видно, оба этих элемента представляют собой поверхность вращения с образующей прямой, наклонной к оси вращения. Так же одинаков набор параметров характеризующих эти КТЭ. Поэтому при распознавании такие элементы образуют конфликтное множество. Следовательно, возникает задача многокритериальной классификации с нечетко разграниченными классами объектов.

В качестве критериев выбора выступают ограничения на параметры КТЭ. При этом большинство ограничений являются нечеткими. Например, ограничения на длину фаски l , шероховатость поверхности Ra , качество точности T . Данная задача известна и достаточно хорошо разработана в области дифференциальной диагностики [3].

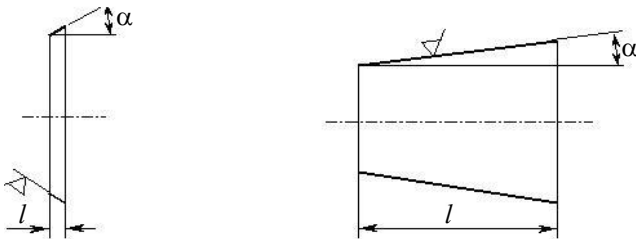


Рис. 1. Пример представления конструкторско-технологического элемента фаска (а) и коническая ступень (б)

Анализ работ в этой области показывает, что в качестве математической базы для решения данной задачи может использоваться теория нечетких множеств Л.А. Заде [4]. Пусть U – полное множество, охватывающее все объекты некоторого класса. Нечеткое подмножество F множества U , которое в дальнейшем будем называть нечетким множеством, определяется через функцию принадлежности $\mu_F(u)$, $u \in U$. Эта функция отображает элементы u_i множества U на множество вещественных чисел отрезка [3, 4], которые

указывают степень принадлежности каждого элемента нечеткому множеству F .

В этом случае каждый тип КТЭ представляет собой класс объектов, характеризующихся соответствующим набором частных критериев (параметры точности, шероховатости, геометрические характеристика и т.п.) в виде кортежа:

$$\langle A_1^k, A_2^k, \dots, A_n^k \rangle, \quad (4)$$

где A_n^k – нечеткое множество на базовом множестве X_i , ($X_1 = Ra$, $X_2 = l$, $X_3 = T$), k – k -й тип КТЭ.

Тогда любой набор геометрических элементов, предположительно формирующих КТЭ, характеризуется вектором исходных данных:

$$(\bar{u}) = (u_1, \dots, u_n), u_i \in X_i, \quad (5)$$

где u_i – конкретное значение критерия, характеризующего КТЭ.

В соответствии с известными подходами был введен обобщенный критерий КТЭ D^k , который представляет собой декартово произведение частных критериев:

$$\forall k : D^k = A_1^k \times \dots \times A_n^k. \quad (6)$$

Значение обобщенного критерия, для заданного вектора исходных данных (4), можно определить зависимостью:

$$\mu_{D^k}(\bar{u}) = \min \{ \mu_{A_1^k}(u_1), \dots, \mu_{A_n^k}(u_n) \}. \quad (7)$$

В случае если критерии неравнозначны, каждому из них приписывается число $\alpha_i \geq 0$ – коэффициент относительной важности. Тогда набор частных критериев принимает вид:

$$\langle (A_1^k)^{\alpha_1}, (A_2^k)^{\alpha_2}, \dots, (A_n^k)^{\alpha_n} \rangle, \quad (8)$$

$$\alpha_i \geq 0, i = \bar{1}, \bar{n}; \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad (9)$$

где α_i определяются на основании процедуры парных сравнений критериев. По известной методике находится w – собственный вектор матрицы B , соответствующий максимальному собственному значению матрицы λ_{\max} :

$$B_w = \lambda_{\max} w. \quad (10)$$

Значения коэффициентов α_i получаются умножением элементов w на n для выполнения условия (9).

При определении нечетких параметров КТЭ эксперты должны указать нечеткие ин-

тервалы или значения, в которых, по их мнению, может находиться тот или иной параметр. На основании этих данных необходимо построить функции принадлежности, которые определяют принадлежность объекта тому или иному типу по каждому параметру. Наличие известных функций принадлежности позволяет производить математическую обработку нечетких суждений, высказанных экспертами.

Анализ литературы показывает, что наиболее подходящим, в данном случае, является метод, который сводится к отысканию параметров заданной (экспоненциальной) функции, на основании результатов экспертного опроса, которая отвечает естественным свойствам функций принадлежности – наличие одного максимума и гладкие затухающие до нуля фронты.

Для числа приблизительно равного некоторому числу K функция имеет вид:

$$\mu_k(u) = e^{-\alpha(k-u)^2}, \quad (11)$$

где α зависит от требуемой нечеткости $\mu_k(u)$ и определяется из выражения:

$$\alpha = \frac{4 \ln 0,5}{\beta^2}, \quad (12)$$

где β – расстояние между точками перехода для $\mu_k(u)$, т.е. точками, в которых функция вида (11) принимает значение 0,5.

Таким образом, задача построения $\mu_k(u)$ для некоторого числа сводится к отысканию параметров a и b , чтобы затем можно было определить $\beta(x)$ и, используя α , построить $\mu_k(u)$.

Для определения множества вида с числом, приблизительно равным K , следует выяснить, как эксперты представляют себе границы классов таких чисел. Для этого проводятся статистические исследования. Экспертам предлагают назвать такие $a(k)$ и $b(k)$, которые, по их мнению, отделяют числа, приблизительно равные заданному K , от чисел, таковыми не являющимися.

Также $\beta(x)$ может быть непосредственно определено при экспертном опросе. В этом случае эксперту предлагают назвать не только само число K , но и точку степень принадлежности которой понятию числа приблизительно равному K , по его мнению, равна 0,5. Тогда $\beta(k) = 2|K - a|$.

В случае, когда параметр определяется нечетким интервалом, заданным значениями K_1 и K_2 , принимаем функцию принадлежности

заданной выражением (13) вблизи K_1 и K_2 , равной 1 между ними. Тогда

$$\mu(u) = \begin{cases} e^{-\alpha_1(k_1-u)^2}, & \text{если } u \leq K_1 \\ 1, & \text{если } K_1 < u < K_2 \\ e^{-\alpha_2(k_2-u)^2}, & \text{если } u \geq K_2 \end{cases} \quad (13)$$

Описанная выше методика определения функций принадлежности, верна для непрерывных величин, характеризующих такие критерии, как параметр шероховатости Ra или длина ступени l . Для дискретных величин с небольшим базовым множеством, например качество точности размера T , функцию принадлежности эксперты могут задать перечислением.

Схему обработки конструкторско-технологического элемента ($C_{КТ}$) можно представить, как взаимодействие самого КТЭ ($\mathcal{E}_{КТi}$) и инструмента (I_i). При этом в данной работе нас будет интересовать только движения КТЭ ($D\mathcal{E}_{КТi}$) и движения инструмента (DI_i), образующих схему обработки [1, 2].

Структурный состав станка (S) представляется совокупностью составляющих его блоков (B_C) и множеством движений (D_C), характеризующих каждый блок станка. Однако для общего представления информации о станке, на данном этапе необходимы следующие данные о блоках станка. Необходимые данные можно отнести к параметрам каждого из блоков станка:

- назначение блока станка (для обеспечения движения инструмента или детали);
- возможность обеспечения назначения блоком своих функций (описывается множеством объектов, которые могут использоваться данным блоком).

Приняв, что мы получили КТЭ, описывающие исходную деталь, для каждого КТЭ можно получить массив схем обработок при использовании различных формообразующих движений и инструмента. На рис. 2 представлено описание различных схем обработки для одного из КТЭ.

Анализ современных многоцелевых станков с программным управлением (табл. 1) показывает, что все движения, в том числе и формообразующие, с точки зрения общей теории станков называются исполнительными. По целевому признаку их можно разделить на движения формообразования Φ ; установочные $Уст$; деления $Д$; управления $Упр$ и вспомогательные $Всп$.

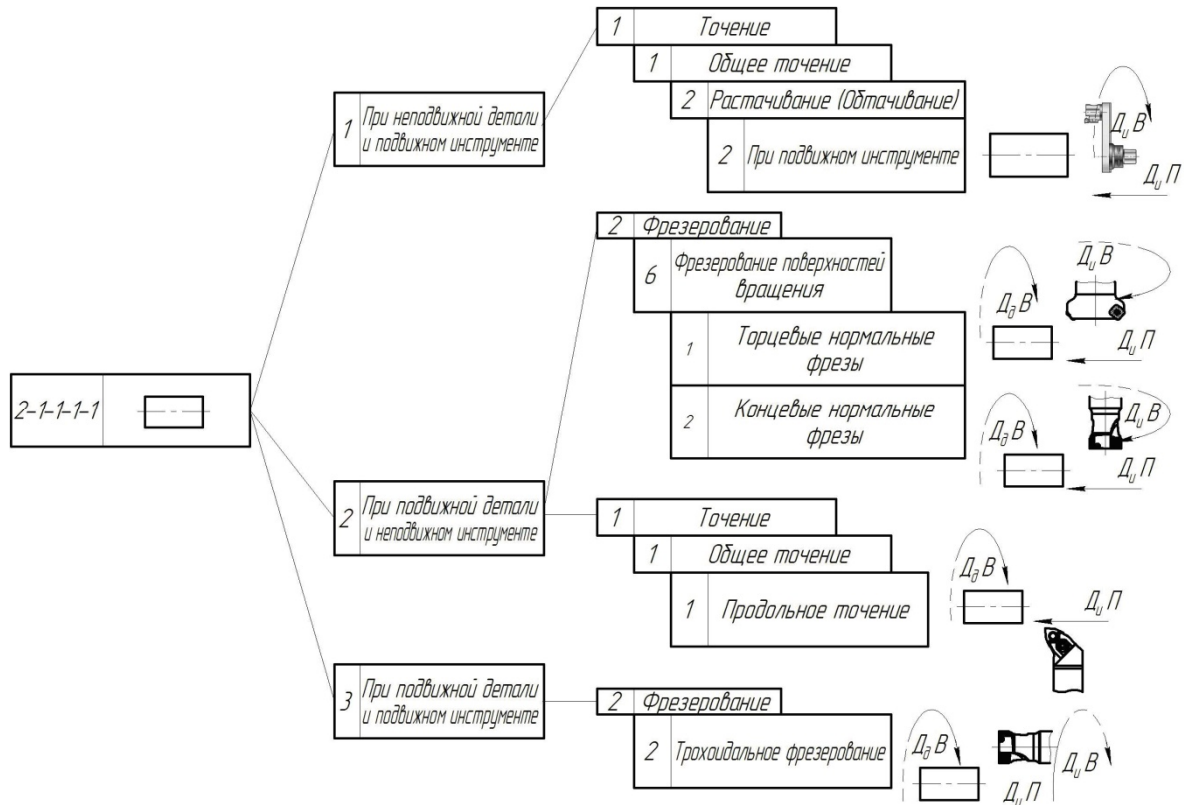


Рис. 2. Пример формирования различных схем обработки цилиндрической ступени вала

Синтез технологического процесса для КПС представляет собой методику последовательного анализа возможности обработки элементарной поверхности с достижением на финишном переходе параметров точности и качества, обоснованные для функциональных поверхностей по условию заданной долговечности. Для каждой элементарной поверхности предлагается максимально возможное число вариантов обработки, анализируется возможность реализовать формообразующие движения на станке и, в итоге, сформировать ТП для комплексной обработки заготовки.

Решение прямой задачи размерного анализа по этой системе требует оптимизации с учетом затрат не только на изготовление и эксплуатацию, но и на ремонт, а также связанный с ним простой оборудования. Разработана математическая модель экономичности обеспечения параметров. Она базируется на учете себестоимости выполнения технологических операций и их влиянию на получения определенных значений параметров точности и эксплуатационных свойств деталей.

В общем случае полученные модели имеют вид:

$$F = k_0 \prod_i T_{SKz_i}^{m_i} \quad (14)$$

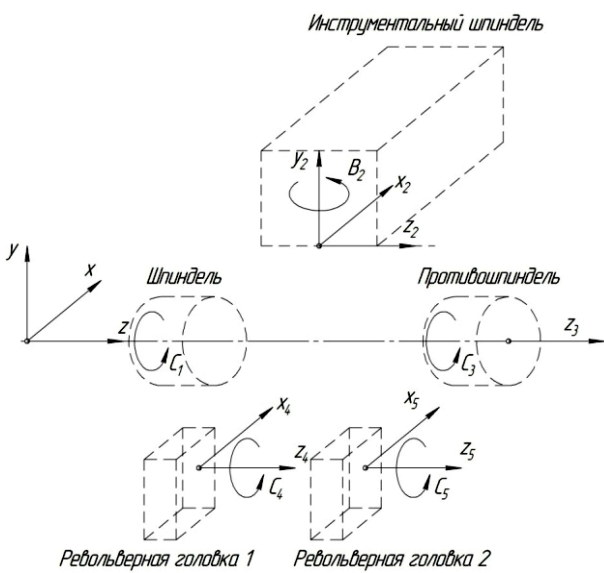
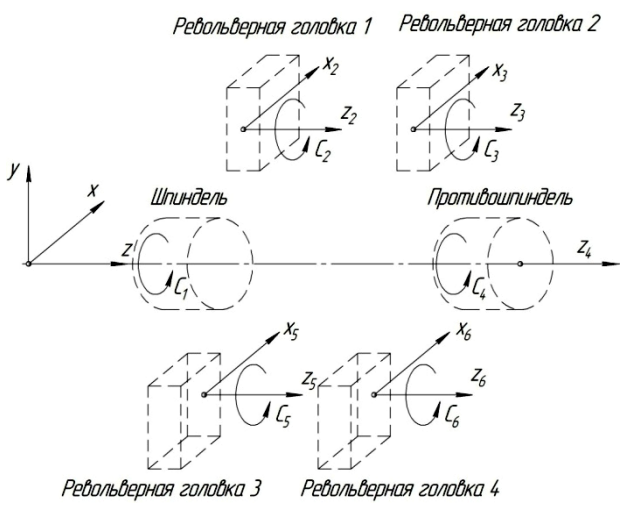
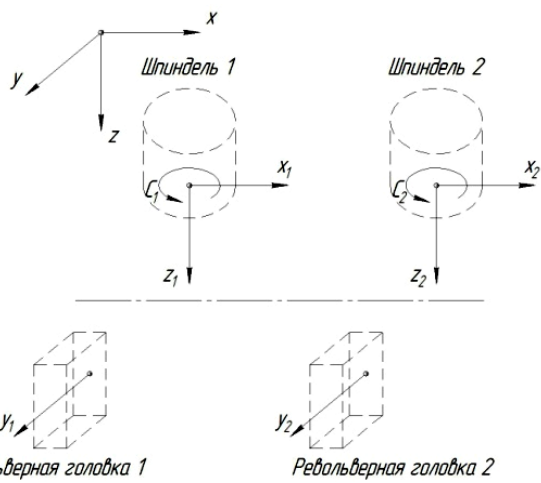
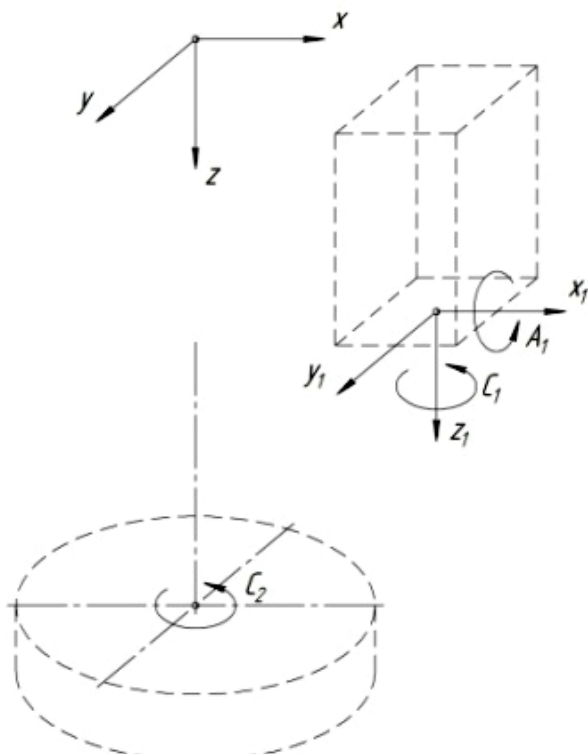
В общем виде допуск линейного замыкающего звена складывается из допусков составляющих звеньев в каждой из проекций с учетом угловых размеров [2]:

$$T_{\Delta} \geq \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{t}{\beta} \sqrt{\sum_j^n (A_{ij} \lambda_{ij} T_j)^{\mu}} + \sum_k^m (E_{ik} \lambda_{ik} T_{эк_k})^{\mu} \right)^2} \quad (15)$$

где t – коэффициент риска, характеризующий вероятность выхода отклонений звена за пределы допуска; λ – коэффициенты относительного среднеквадратичного отклонения; β – коэффициент расширения допуска; μ – коэффициент степени, учитывающий метод расчета размерных цепей.

Размеры, входящие в размерную цепь, обязательно являются независимыми величинами. Между ними могут существовать различного рода связи. Например, обычные технологические размеры деталей, изготовленных с применением одного и того же приспособления, инструмента или на одном и том же настроенном оборудовании, часто имеют корреляционную связь. Корреляция оказывает дополнительное воздействие при расчете допуска замыкающего звена вероятностным методом [1]:

1. Схемы компоновок станков с программным управлением

<p>1. Горизонтальная компоновка токарного станка, со шпинделем и протившпинделем, инструментальным шпинделем, двумя револьверными головками</p>  <p>The diagram shows a horizontal lathe configuration. At the top, an 'Инструментальный шпиндель' (Instrumental spindle) is shown with a coordinate system (x_2, z_2) and a rotation arrow B_2. Below it, the main 'Шпиндель' (Spindle) and 'Протившпиндель' (Counter-spindle) are shown with coordinate systems (z_1, x_1) and (z_3, x_3) respectively, and rotation arrows C_1 and C_3. At the bottom, two turret heads are shown: 'Револьверная головка 1' with coordinate system (x_4, z_4) and rotation arrow C_4, and 'Револьверная головка 2' with coordinate system (x_5, z_5) and rotation arrow C_5. A global coordinate system (x, y, z) is shown on the left.</p>	<p>2. Горизонтальная компоновка токарного станка, со шпинделем и протившпинделем, с четырьмя револьверными головками</p>  <p>The diagram shows a horizontal lathe configuration with four turret heads. At the top, 'Револьверная головка 1' and 'Револьверная головка 2' are shown with coordinate systems (x_2, z_2) and (x_3, z_3) and rotation arrows C_2 and C_3. Below them, the 'Шпиндель' (Spindle) and 'Протившпиндель' (Counter-spindle) are shown with coordinate systems (z_1, x_1) and (z_4, x_4) and rotation arrows C_1 and C_4. At the bottom, two more turret heads are shown: 'Револьверная головка 3' with coordinate system (x_5, z_5) and rotation arrow C_5, and 'Револьверная головка 4' with coordinate system (x_6, z_6) and rotation arrow C_6. A global coordinate system (x, y, z) is shown on the left.</p>
<p>3. Вертикальная компоновка токарного станка с двумя шпинделями и двумя револьверными головками</p>  <p>The diagram shows a vertical lathe configuration. At the top, 'Шпиндель 1' (Spindle 1) and 'Шпиндель 2' (Spindle 2) are shown with coordinate systems (x_1, z_1) and (x_2, z_2) and rotation arrows C_1 and C_2. Below them, two turret heads are shown: 'Револьверная головка 1' with coordinate system (y_1, z_1) and rotation arrow A_1, and 'Револьверная головка 2' with coordinate system (y_2, z_2) and rotation arrow A_2. A global coordinate system (x, y, z) is shown on the left.</p>	<p>4. Вертикальная компоновка многоцелевого станка с вращением стола с деталью и свободного перемещения инструмента</p>  <p>The diagram shows a vertical multi-purpose machine configuration. At the top, a global coordinate system (x, y, z) is shown. Below it, a rotating table is shown with a coordinate system (x_1, z_1) and rotation arrow C_1. At the bottom, another coordinate system (y_1, z_1) and rotation arrow A_1 are shown. A dashed box indicates the tool's movement area.</p>

$$K_{\Sigma}^2 T_{\Sigma}^2 = \sum_{i,j}^{pq} C_{ij}^2 K_{ij}^2 T_{ij}^2 + 2 \sum_{j=1}^q \left(C_j K_j T_j \sum_{i=2}^{m(n,\dots,p)} r_{ij} C_{ij} K_{ij} T_{ij} \right), (16)$$

где i – порядковый номер зависимых величин внутри каждой группы; j – порядковый номер групп зависимых величин.

Известно, что протекающие процессы на поверхностях эксплуатируемых деталей (изнашивание, деформации и т.п.) тесно связаны с состоянием этой поверхности и условиями их работы. В ходе исследований проведен корреляционный анализ связей между некоторыми видами конструкторских и эксплуатационных размеров.

Износ поверхностей зависит от вида сопряжения, поэтому в определенной степени точность выполнения размеров сопряжения, точности формы и расположения поверхностей влияет на интенсивность изнашивания (рис. 3). Это воздействие проявляется через изменение номинальной площади контакта, скоростей скольжения, увеличения динамической составляющей нагрузки и т.п. Для сопряжения «вал-штулка» были получены коэффициенты парной корреляции между величиной линейного износа и параметрами шероховатости, отклонениями профиля продольного сечения, радиального биения [5].

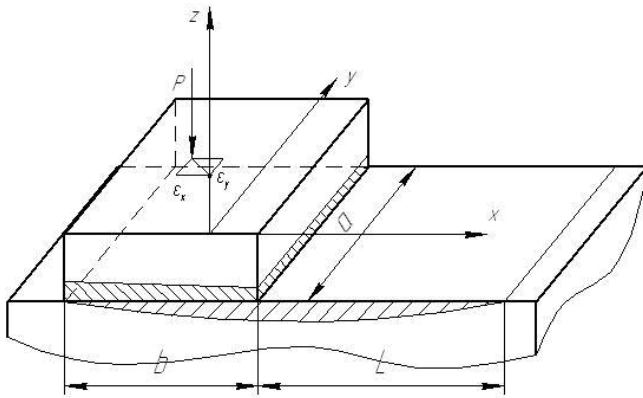


Рис. 3. Расчетная схема определения влияния эксплуатационных свойств на долговечность соединения

Таким образом, объединение конструкторских цепей с технологическими цепями позволяет более гибко управлять качеством машин, в том числе определять параметры эксплуатационных свойств поверхностей деталей. Общие размерные схемы позволяют проследить совместное влияние различных параметров на качество и, прежде всего, точность

проектируемых машин и отдельных сборочных единиц.

Применение численной оптимизации системы ограничений заключается в уходе от ручных методов, которые обычно сводятся к усреднению звеньев цепи или по величине допуска, или по значению качества. Допуск обоснованно перераспределяется из менее строгих размерных цепей или составляющих размеров в более ответственные цепи с трудно реализуемыми размерами.

Если требования производства в процессе проектирования и простановки размеров детали учитываются в недостаточной мере, то при изготовлении и восстановлении деталей возникают затруднения, которые удлиняют сроки подготовки производства и могут вызвать дополнительную потребность в технологической оснастке и привести к увеличению трудоемкости, что в конечном итоге приведет к увеличению себестоимости продукции [2].

Два показателя технологичности конструкции изделия (ТКИ), рекомендуемые в соответствии с ГОСТ 14.201–83, можно изменить различными сочетаниями баз размеров:

- трудоемкость изготовления изделия;
- удельная материалоемкость (удельная металлоемкость, удельная энергоемкость).

Взаимное расположение поверхностей деталей можно задать на чертежах различными системами размеров, обеспечив при этом разную точность. Простановка размеров и допусков на чертеже детали должна отображать требования, предъявляемые к этой детали, исходя из ее служебного назначения, и обеспечивать возможность изготовления детали простыми технологическими методами, с помощью которых может быть достигнуто выполнение требований, предъявляемых к ней с учетом конструкции машины.

В формализованном виде процесс обеспечения технологичности изделия можно представить как воздействие на множество параметров точности размеров изделия $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, которое приводит к достижению экстремальной цели при соблюдении сформулированных ограничений вида $g_i(X) = 0$ и $h_j(X) \geq 0$ [1].

$$Q(X) \rightarrow \underset{X \in S}{extr} \quad S: \begin{cases} g_i(X) = 0, & i = \overline{1, I}; \\ h_j(X) \geq 0, & j = \overline{1, J}; \end{cases} \quad (17)$$

где Q, g, h – функции, которые определяются исходя из требований точности размеров изделия и разнообразных производственных, эксплуатационных и ремонтных факторов, влияющих на технологичность изделий.

Размерная структура техпроцесса представлялась в двух основных видах: в виде размерной схемы и в виде размерного графа, объединяющего размеры детали, заготовки и техпроцесса:

$$G = \{G_{дет}, G_{заг}, G_{тех}\}, \quad (18)$$

где $G_{дет}$ – граф конструкторских размеров детали; $G_{заг}$ – граф конструкторских размеров исходной заготовки; $G_{тех}$ – граф технологических размеров и припусков ТП механической обработки.

Рассмотрим граф размерной структуры ТП. Он представляет собой совокупность размерных связей, которые с позиции оптимизации размерной структуры ТП можно разделить на изменяемые и неизменяемые.

К неизменяемым размерным связям отнесём:

- конструкторские размеры (в размерной структуре они не могут быть изменены без изменения чертежа детали, согласованного с конструктором);

- припуски (они могут быть изменены только при изменении плана обработки);

- размеры исходной заготовки (они могут измениться только при изменении чертежа исходной заготовки, связанного с изменением технологии ее получения).

Количество неизменяемых размерных связей в графе:

$$n_{н} = n_{к} + n_{п} + n_{з},$$

где $n_{к}$ – количество конструкторских размеров; $n_{п}$ – количество припусков; $n_{з}$ – количество размеров исходной заготовки.

К изменяемым размерам отнесем технологические размеры, выполняемые на операциях технологического процесса, их простановка изменяется при изменении технологических и измерительных баз на операциях [1].

Погрешность обработки – параметр, зависящий (при неизменных планах обработки поверхностей) от оборудования и оснастки. Он влияет на выбор допусков технологических размеров и определяет экономическую эффективность ТП. Для его учёта создадим для каждой типовой размерной структуры матрицу средне экономических допусков (СЭД) на

основе матрицы размерной структуры:

$$M_{СЭД} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1k} \\ T_{21} & T_{ij} & \dots & T_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{k1} & T_{k2} & \dots & T_{kk} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где T_{ij} – средне экономический допуск технологического размера между i -й и j -й поверхностями, если с i -й поверхности снимается припуск, а j -я используется в качестве измерительной базы.

Часть ограничений учитывается при построении матрицы типовой размерной структуры ТП. Для учета остальных на основе $M_{СЭД}$ создаем матрицу точности и свойств поверхностей (ТСП), записывая в матрице экономических допусков нули вместо допуска для тех случаев, когда простановка размера между поверхностями не возможна:

$$M_T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1k} \\ t_{21} & t_{ij} & \dots & t_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{k1} & t_{k2} & \dots & t_{kk} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где $t_{ij} = T_{ij}$ из (19), если между поверхностями возможна простановка размера на технологической операции, и $t_{ij} = 0$, если невозможна.

Для математической модели запишем:

$$M = \{M_{ТПС}, M_{ПЦ}, M_T\}. \quad (21)$$

Модель размерной структуры технологического процесса механической обработки учитывает все технологические, конструкторские и экономические факторы (рис. 4). Кроме того, выявлены ограничения модели, что позволяет в дальнейшем перейти к ее комплексной оптимизации. Разработана программа реализации размерно-точностного анализа с модулем оптимизации структуры размерных связей для повышения технологичности конструкции детали на основе элементов CALS-технологий.

Критерий Q учитывает комплекс конструкторско-технологических и структурных ограничений матрицы точности и свойств поверхностей, экономических факторов целевой функции, при этом является безразмерной величиной, не изменяющей физического смысла.

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1, j=1}^{k, k} \left(c_{ij} e_{ij} t_{ij} \sum_{u=1}^{k-1} |b_{(ij)u}| \right), \quad (22)$$

где 1/2 – коэффициент, учитывающий дублирование размерных связей в матрице ТРС; k – количество узлов графа размерной структуры (равно размерности матрицы ТРС); $c_{ij} = 2^{K-Ky}$ – коэффициент увеличения трудоемкости при ужесточении средне-

экономического допуска (по существующим нормативам при увеличении точности на качество (К-Ку), увеличивается в 2 раза); $e_{ij} = 1000/l_{ij}$ – коэффициент приведения точности (равен обратной величине единицы допуска, приведенной к мм), 1/мм; t_{ij} – коэффициент из матрицы ТСП, мм; $b_{(ij)u}$ – коэффициент матрицы размерных цепей, соответствующий a_{ij} из матрицы РС.

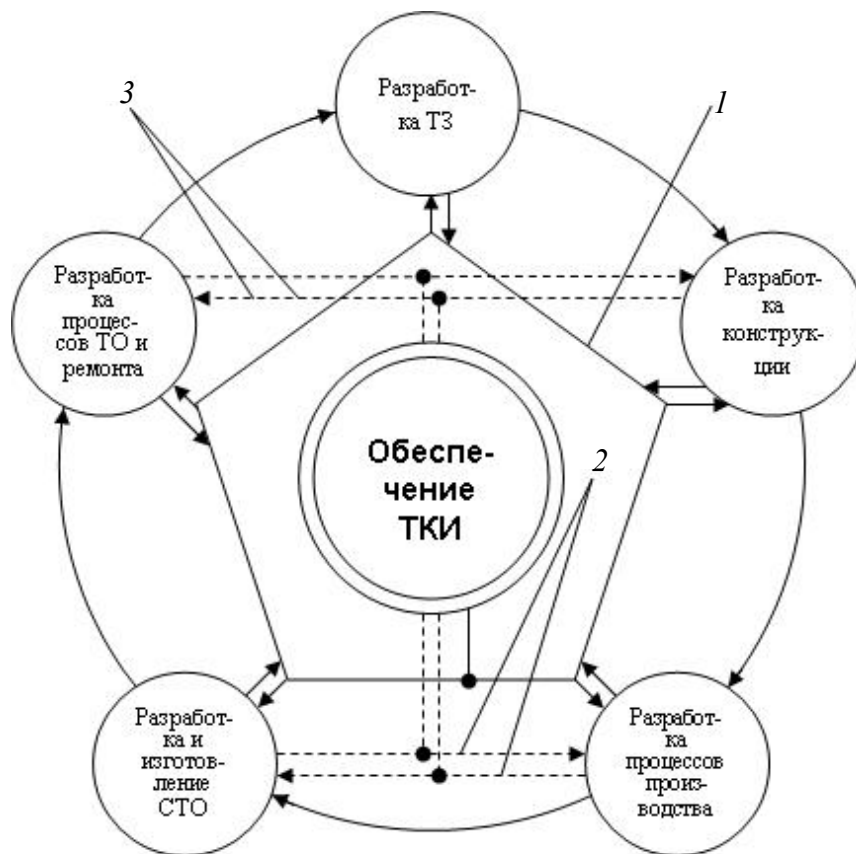


Рис. 4. Схема отработки изделия на технологичность с учетом анализа размерных связей

Выводы:

1. Предложена концепция автоматизированной подсистемы технологической подготовки производства, обеспечивающая определение конструктивных размеров и корректировку точности функциональных размеров отдельных деталей по критериям повышения технологичности конструкции при оптимизации простановки технологических размеров для различных вариантов реализации операций механической обработки (выбор схемы установки заготовки, настройка станков различных типов на обеспечение требуемой точности конструкторских размеров).

2. По критериям минимизации припуска и (или) минимуму рабочих ходов оптимизируется РТА при различных схемах простановки операционных размеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г., Федонин, О.Н., Польский, Е.А. Научноёмкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2016. – №5 (59). – С. 34–41.
 2. Польский, Е.А., Филькин, Д.М. Технологическое обеспечение качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей с учетом эксплуатации // Научноёмкие

технологии в машиностроении. – 2014. – №11 (41). – С. 36–44.

3. **Искусственный интеллект:** Применение в интегрированных производственных системах / под ред. Э. Кьюсиака; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.

4. **Представление** и использование знаний / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука; пер. с япон. – М.: Мир, 1989. – 220 с.

5. **Польский, Е.А.** Технологическое обеспечение работоспособности узлов машин на основе анализа размерных параметров на этапах жизненного цикла с учетом их изменения в процессе эксплуатации // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №2 (32). – С. 38–48.

REFERENCES

1. Suslov, A.G., Fedonin, O.N., Polsky, E.A. High technology for quality increase of machinery assemblies at life

stages // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – №5 (59). – pp. 34–41.

2. Polsky, E.A., Filkin, D.M. Technological support of assemblies quality based on analysis of dimensions ties taking into account operation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – №11 (41). – pp. 36–44.

3. Artificial Intelligence: Application in Integrated Production Systems / under the editorship of E. Cusack; transl. from. Engl. – М.: Mechanical Engineering, 1991. – pp. 544.

4. Presentation and Use of Knowledge / under the editorship of H. Ueno, M. Isizuka; transl. from Japanese. – М.: Mir (World), 1989. – pp. 220.

5. Polsky, E.A. Technological support of machinery unit capacity for work based on analysis of dimensions data at life cycle stages taking into account their changes during operation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – №2 (32). – pp. 38–48.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

Уважаемые читатели и подписчики!

Подписка на I полугодие 2017 г. на журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» проводится:

– через агентство «Роспечать» индекс 79195;

– через Брянский государственный технический университет.

Адрес: 241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7. БГТУ.

Издательство БГТУ

E-mail: avkbgtu@gmail.com

E-mail: naukatm@yandex.ru (редакция)

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

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

Учредитель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

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. Дюбокова.

Сдано в набор 15.07.2016. Подписано в печать 09.09.2016.

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

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7