

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 7 (61)

2016

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

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

ПН № ФС77-43337

ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Шаврин О.И. Нанотехнологии в машиностроении 3

Шалыгин М.Г. Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации 10

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Булыжев Е.М., Худобин Л.В. Высокопроизводительные намывные фильтры 14

Клепиков В.В., Черепашин А.А. Повышение точности чистовой обработки зубчатых колес 24

ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Техничко-экономические аспекты аддитивного формообразования 28

Порошин В.В., Богданов А.В., Зябрев И.А. Разработка способа аддитивного технологического процесса газопорошковой лазерной наплавки 35

Курынец С.В., Нагулин К.Ю., Горунов А.И. Аддитивные технологии – третья индустриальная революция 39

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Ингеманссон А.Р. Актуальность внедрения концепции «индустрия 4.0» в современное машиностроительное производство 45

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 «Научноёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 7 (61)

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: naukatm@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 № ФС77-43337

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE MATERIALS PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

Shavrin O.I. Nanotechnologies in mechanical engineering 3

Shalygin M.G. Structure formation in surface layer of machine parts by methods of high-vacuum annealing and ion implantation 10

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Bulyzhev E.M., Khudobin L.V. Highly productive precoat filters. 14

Klepikov V.V., Cherepakhin A.A. Accuracy increase in cog-wheel finishing. 24

TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND LASER PROCESSING

Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Technical and economic aspects of additive shaping. 28

Poroshin V.V., Bogdanov A.V., Zyabrev I.A. Development of additive technological method for gas-powder laser surfacing process. 35

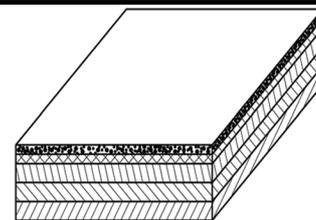
Kuryntsev S.V., Nagulin K.Yu., Gorunov A.I. Additive Techniques – the third industrial revolution. 39

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Ingemansson A.R. Urgency of “industry 4.0” concept introduction in modern mechanical engineering. 45

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 621.789
DOI: 10.12737/20593

О.И. Шаврин, д.т.н.
(Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
426039, РФ, УР, г. Ижевск, ул. Студенческая, д.7)
E-mail: shavrin@istu.ru

Нанотехнологии в машиностроении*

Рассмотрены методы получения наноматериалов конструкционного назначения. Основное внимание уделено термомодеформационной обработке как методу формирования наноразмерной субструктуры.

Используя принципы термомодеформационной обработки, можно изготавливать высокопрочные пружины, валы различного назначения.

Ключевые слова: наноразмерность; субструктура; нанотехнология; пружины; валки; циклическая прочность.

O.I. Shavrin, D.Eng.
(Kalashnikov State Technical University of Izhevsk,
7, Studencheskaya Str., Izhevsk 426039, UR, Russia7)

Nanotechnologies in mechanical engineering

For the production of structural steel with a nanostructure there are used methods combined into five groups – powder metallurgy, amorphous state crystallization, intensive plastic deformation, surface and volumetric thermo-deformation treatment. The last method is the most effective one for products subjected to cyclic loads and destructed because of fatigue. A limited longevity at loads exceeding fatigue strength increases ten times and more. A thermo-deformation working is carried out at the production of cylindrical spiral springs, cylindrical parts – shafts, axles, mill rollers.

Keywords: nano-dimension; substructure; nanotechnology; springs; rollers; cyclic strength.

Связь понятий «реальный металл», деталь, конструкция и «нано» в любом сочетании – наноматериал, наночастицы, нанотехнология – не может быть отвлеченной, диктуемой только новизной и интересом к познанию неизвестного явления, но иметь вполне прагматическую цель – получить не просто наноматериал, металл с какими-то nanoособенностями структуры, а реальную конструкцию, изделия машиностроения из такого материала. Известно, что получить материал с какими-то особенными свойствами – это одна проблема, а изготовить из него деталь и использовать её в конструкции – это другая проблема и не всегда реализуемая.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEF157714X0011.

Для конструкционных материалов и изделий, которые из них изготавливаются, под нанотехнологией принято понимать процессы формирования каких-либо элементов структуры, получающих размеры, соответствующие установленному требованию – менее 100 нм хотя бы в одном из направлений измерения.

Упрочняющее воздействие наноразмерных элементов структуры – торможение дислокаций, обеспечивающее повышение сопротивления деформации под действием напряжений. Такими элементами структуры могут быть границы зерен, дисперсные выделения карбидов, нитридов, карбонитридов и других, границы субзерен, образующихся в результате перестроения дислокаций, образовавшихся в ходе пластической деформации, применяющейся либо при производстве металла, либо при изготовлении деталей [1].

По результатам исследований [2 – 7] сфор-

мулированы методы получения нанометаллов конструкционного назначения. Их можно объединить в группы [1, 8]:

- порошковая металлургия (компактирование нанопорошков);
- кристаллизация аморфного состояния;
- интенсивная пластическая деформация;
- поверхностная и объемная термомеханическая обработка.

Первые четыре группы основываются на представлении, что процесс сопротивления деформации и разрушению контролируется размерами зерен или частиц нанопорошков. Пятый основывается на фактах зависимости сопротивления малым пластическим деформациям и разрушению при циклических нагрузках и вообще прочности от тонкой структуры зерен – ячеек, полигонов [9 – 10].

Создание технологий, реализующих методы получения конструкционных нанометаллов, реализуемых в машиностроении, актуально.

Рассматривая возможную связь понятия реальный металл, изделие из него и «нано» можно предложить своеобразный алгоритм рассмотрения проблемы:

1. Цель, которой нужно добиться. Целью может быть повышение конструктивной прочности. Конструктивная прочность – это и характер нагрузок (статические, ударные, циклические), температурные условия эксплуатации, соотношение уровня рабочих напряжений и характеристик прочности металла, состояние поверхности детали – наличие концентраторов напряжений и т.д.

2. Структурные факторы, определяющие уровень конструктивной прочности.

Сказанное приводит к выводу, что разрабатываемая схема реализации или получения «нано» в реальных металлах и конструкциях должна быть направлена на получение какой-либо определенной особенности структуры материала, которая будет определять работоспособность детали в условиях эксплуатации. Особо стоит вопрос о влиянии каких-либо наноразмерных изменений структуры материала у деталей, испытывающих циклические нагрузки, или, как говорят, работающих на усталость.

Для такого класса деталей из большого количества факторов, определяющих работоспособность деталей в условиях циклического нагружения можно выделить два структурных самостоятельных фактора: размеры элементов структуры и карбидных частиц, которые формируются технологией. Упрочняющая роль

дисперсности карбидов известна. Известно также и то, что при обычной закалке конструкционных сталей получение карбидов размерами 20...100 нм возможно.

Для деталей, работающих на усталость, наиболее важное значение для увеличения уровня разрушающих напряжений будет иметь размер элементов субструктуры. Это утверждение основывается на установленных фактах:

1. Процесс зарождения усталостной трещины происходит в результате образования критических скоплений дислокаций перед структурными барьерами.

2. Рабочие напряжения, инициирующие движение дислокаций, составляют долю от предела упругости.

3. При этих напряжениях эффективными барьерами для движения дислокаций становятся субграницы полигонов и ячеек внутри зерен. Дисперсность элементов субструктуры обеспечивает равномерное движение дислокаций и затрудненность формирования критических плотностей, увеличивающих количество циклов нагружения необходимых для этого [9].

Формирование такой структуры в конструкционных металлических материалах возможно технологическими методами.

Применительно к конструкционным сталям основой таких технологий могут быть комплексные процессы, использующие различные физические воздействия, например, термическую обработку и пластическую деформацию, осуществляемые в разной последовательности. Варианты таких технологий формирования полигональной субструктуры можно объединить в одно понятие – термомеханическая обработка (ТМО), рассматривая её как метод формирования наноразмерной структуры в конструкционных сталях.

Один из вариантов такой технологии может быть реализован на принципах высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО).

Но ВТМО, осуществляемая при производстве, например, проката по классической схеме в силу особенностей процесса (высокие температуры, дробность деформации и длительность) наноразмерность субструктуры стали не обеспечивает.

Для получения наноразмерной субструктуры нужно изменить параметры процесса и обеспечить управляемость ими. Изменение параметров процесса ТМО должно обеспечить [8]:

- минимизацию температуры при условии его скоротечности, но с обеспечением гомогенизации химического состава;

- уменьшение степени деформации;

- регулируемость охлаждения, включающего использование последеформационных выдержек. Длительность выдержек – величина переменная, зависящая от комплекса параметров процесса: температуры, степени деформации и её длительности.

Для реализации процесса ТДО необходимо специальное оборудование, на котором можно осуществлять процесс, производя заготовки или готовые детали, применяя её в качестве упрочняющей операции.

Исследование влияния процесса ТДО на формирование наноразмерной субструктуры и прочностные характеристики конструкционных сталей и деталей изделий машиностроения проводились на специальном оборудовании, позволяющем производить винтовые пружины по методу горячей навивки [5], проволоку и калиброванную сталь [8] и цилиндрические детали-валки, пальцы, оси ограниченной длины.

Во всех случаях нагрев заготовок металла осуществлялся токами высокой частоты (частота зависит от размеров заготовок). Деформация зависит от вида объекта.

При изготовлении пружин горячей навивки использовалась деформация гибки при формировании витка пружины, при производстве проволоки деформация волочением, калиброванной стали и цилиндрических деталей обкаткой с различными приводами вращения деформирующей валковой головки.

Исследования проводились на ряде сталей: 60С2А, 60С2ХФА, 51ХФА, 45, 40Х, 38ХС, 30ХГСН2А, 9Х, ШХ15.

Выбор марок сталей определялся областями их возможного применения при изготовлении деталей изделий машиностроения – пружин, осей, пальцев траков, валков и т.д.

Прочностные характеристики определялись при различных видах испытания и нагружения в зависимости от назначения и структурного состояния металла: растяжение, изгиб, циклические и контактные нагрузки.

Характеристики прочности и пластичности проволоки при растяжении определяли в соответствии с ГОСТ 10446–80 на универсальной машине с усилием $P_{max} = 100$ кН типа РЭМ-100, оснащенной встроенной системой управления. На этой же машине испытывались на изгиб образцы сталей 60С2А и 9Х в низкоотпущенном состоянии.

Характеристики прочности и пластичности калиброванной стали (сталь 60С2А, 38ХС, 45, 40Х) определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–73 на цилиндрических образцах диаметром 5 мм.

Тонкая структура сталей после ТДО исследовалась с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 М при ускоряющем напряжении 100 кВ.

Заготовки под фольгу толщиной 0,4...0,5 мм отрезались на электроискровом станке. После механического утонения нарезанных заготовок до 0,05...0,10 мм на абразивных шкурках проводилось электролитическое травление в электролите (135 мл ледяной уксусной кислоты, 27 г хромового ангидрита, 7 мл воды).

Усталостная прочность проволоки после ТДО оценивалась по результатам испытания цилиндрических винтовых пружин, навитых из неё. Навивка производилась при комнатной температуре, отпуск после навивки при температуре 240...250 °С.

Винтовые пружины горячей навивки испытывались на усталость на резонансных стендах [5]. Контактная усталость образцов сталей 9Х и ШХ15 после ТДО определялась при контактном нагружении вращающихся образцов в виде роликов.

При статическом нагружении образцов сталей 60С2А, 9Х, ШХ15 было установлено, что при ТДО с применением индукционного нагрева, основной прирост прочности и при испытании на изгиб (низкоотпущенные образцы) и на растяжение получается уже при небольших степенях деформации – 10...15 %.

Степень деформации определялась по отношению площадей образцов до и после высокотемпературной деформации (рис. 1 – 3).

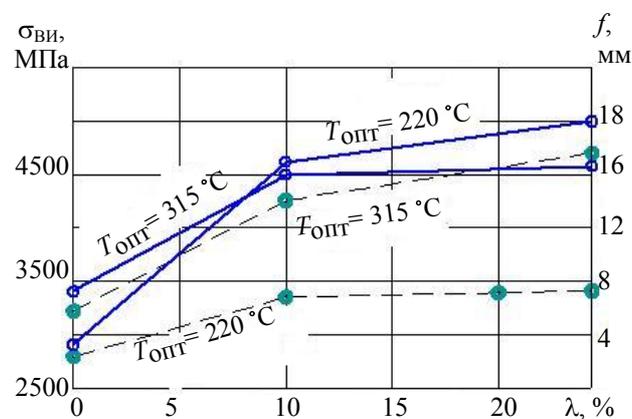


Рис. 1. Влияние степени деформации на свойства стали 60С2А. Испытание на изгиб. $T_{деф} = 1000$ °С; «—» $\sigma_{вн}$; «- - -» f

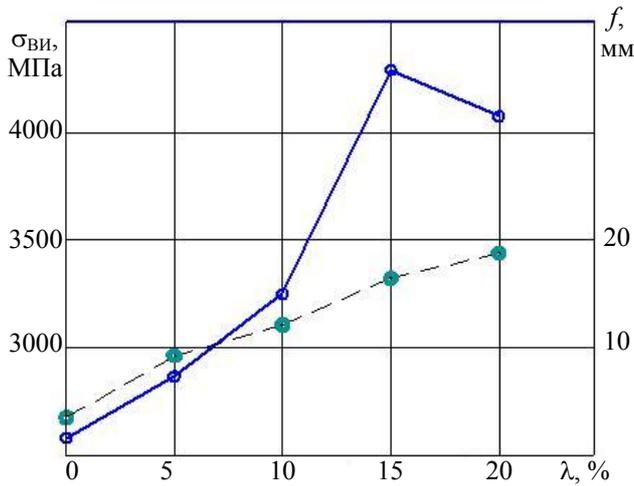


Рис. 2. Влияние степени деформации на свойства стали 9Х. Испытание на изгиб. $T_{\text{деф}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$; упрочнение сквозное $T_{\text{отп}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$; твердость 65...66 HRC; «—» $\sigma_{\text{ви}}$; «- - - -» f

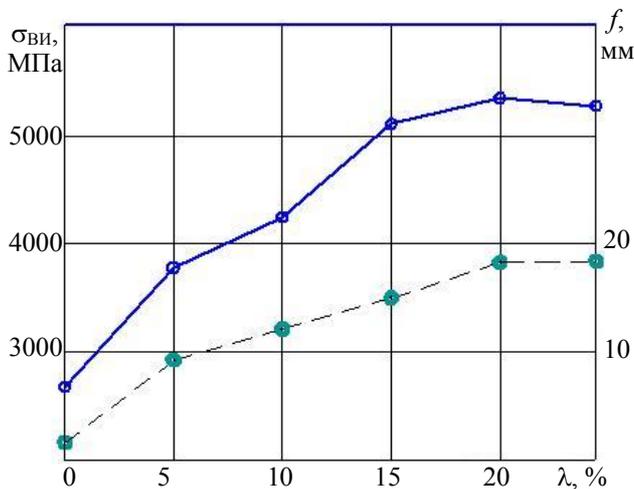


Рис. 3. Влияние степени деформации на свойства стали ШХ15. Испытание на изгиб. $T_{\text{деф}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$; упрочнение сквозное $T_{\text{отп}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$; твердость 65...66 HRC; «—» $\sigma_{\text{ви}}$; «- - - -» f

Этот факт имеет существенное значение при применении ТДО для упрочнения деталей изделий машиностроения, когда использование больших деформаций, рекомендуемых, например при термомеханической обработке проката, нереализуемо.

Одним из видов таких деталей являются крупногабаритные цилиндрические винтовые пружины, изготавливаемые горячей навивкой [5], например пружины подвески грузовых железнодорожных вагонов. Такая пружина – удобный объект для моделирования процессов структурообразования при термомеханических воздействиях: навивка пружины производится при высоких температурах, позволяющих осуществлять закалку с навивочного

нагрева, геометрические параметры (соотношение диаметров прутка и пружины) обеспечивают в наружных слоях металла витка пружины степени деформации 10...20 %, достаточные для получения термомеханического эффекта.

Технология реализации ТДО при изготовлении крупногабаритных пружин включает в себя [5] ряд операций, определяющих их качество: дефектоскопия исходной заготовки – прутка; индукционный объемный нагрев прутка; навивка пружины на оправку; повитковая закалка навиваемой пружины с предварительной посленавивочной выдержкой.

Посленавивочная выдержка необходима для формирования тонкой внутризеренной структуры в стали после деформации при высокой температуре.

Электронномикроскопические исследования показали возможность формирования тонкой полигональной субструктуры в исследованных сталях при ТДО (рис. 4, 5).

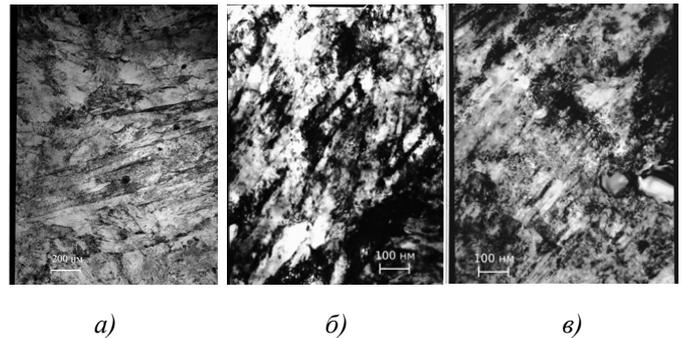


Рис. 4. Тонкая структура:

a – проволока из стали 51ХФА, $T_{\text{деф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 20 \text{ } \%$; *б* – калиброванная сталь 60С2А, $T_{\text{деф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 10 \text{ } \%$; *в* – калиброванная сталь 9Х $T_{\text{деф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 20 \text{ } \%$

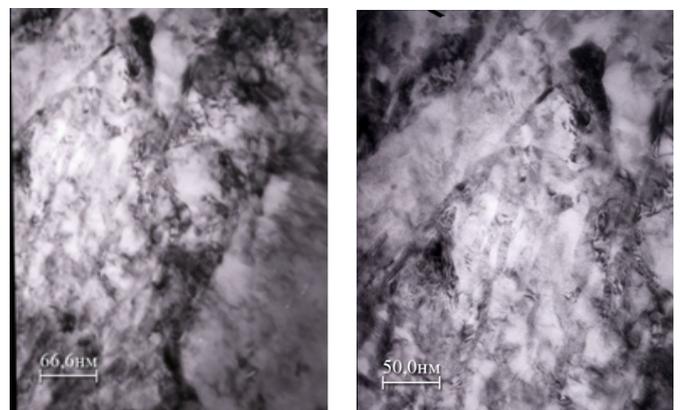


Рис. 5. Тонкая структура материала винтовых пружин (сталь 60С2А, температура нагрева прутка $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, деформация при навивке 20 %, температура отпуска $460 \text{ }^\circ\text{C}$)

Требование о соответствии «нано» – менее 100 нм хотя бы в одном направлении измерения обеспечивается. Так средний размер субструктурных элементов ферритной матрицы в материале поверхностной зоны витка винтовой пружины составляет 20...40 нм при разбросе до 100 нм.

Размер карбидов находится в пределах 7...10 нм. При полной гомогенизации высокотемпературной фазы (при недостаточной температуре индукционного нагрева) в структуре могут быть нерастворившиеся карбиды размерами до 200 нм.

О влиянии субструктуры материала пружины на эксплуатационные характеристики можно судить по результатам исследования осадки пружин во время операции технологического сжатия, релаксационной стойкости при циклических нагрузках, долговечности при испытании на усталость и величине разрушающих напряжений при этом.

О повышенном сопротивлении материала пружин с наноразмерной субструктурой микроскопическим деформациям говорят и результаты изменения свободной высоты (осадки) при циклических испытаниях (рис.6).

Из графиков видно, что величина осадки пружин с наноразмерной структурой в десять раз меньше чем у пружин, изготовленных по обычной технологии.

Нагружение при испытании по пульсирующему циклу. В подрисовочном тексте указана степень деформации наружных волокон – это удлинение наружного волокна при навивке пружины. Она зависит от показателя

$$C = \frac{D}{d}$$

На рис. 7, а, б представлены результаты испытания винтовых пружин из стали 60С2ХФА. Характеристики пружин: диаметр прутка 19 мм; наружный диаметр 134 мм; шаг 40 мм; рабочее усилие 9,59 кН; длина в свободном состоянии 259 мм.

Нагружение пружин проводилось по асимметричному знакопостоянному циклу. Величина статической деформации пружины – 68 мм. Рабочая переменная составляющая деформации ± 21 мм.

В качестве сравнения, характеризующего уровень долговечности пружин, можно взять напряжение 190 мПа; у обычных пружин (кривая усталости рис.7, а) число циклов до разрушения ≈ 230 000, у пружин с наноразмерной структурой 10^7 – без разрушения.

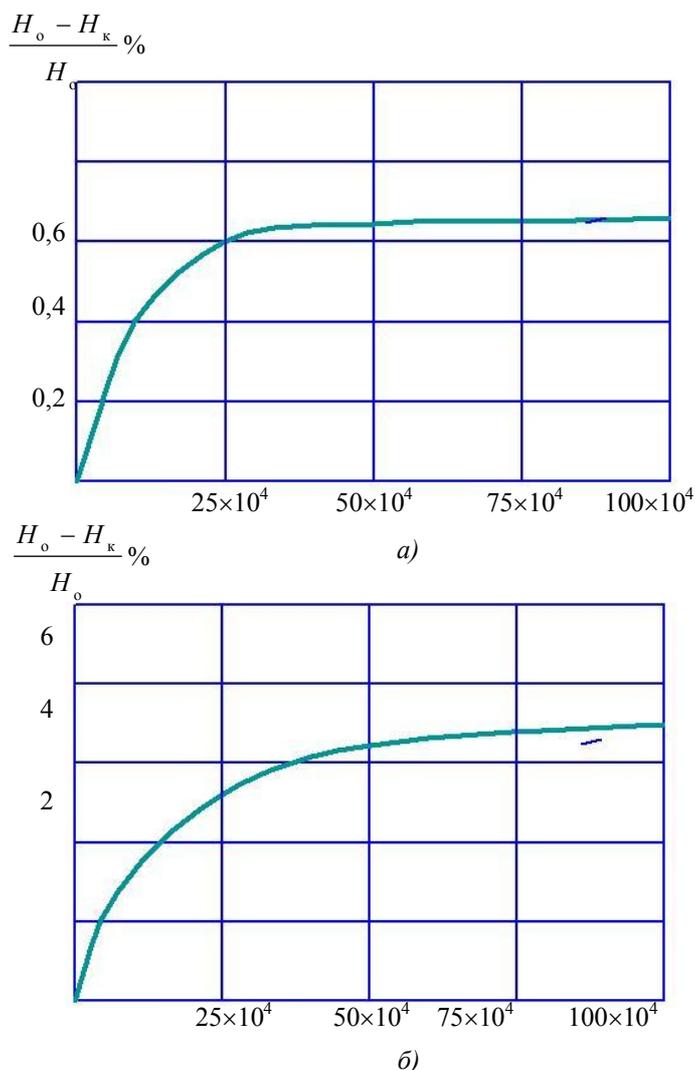


Рис. 6. Изменение свободной высоты пружины H_0 (осадка) при циклическом нагружении:

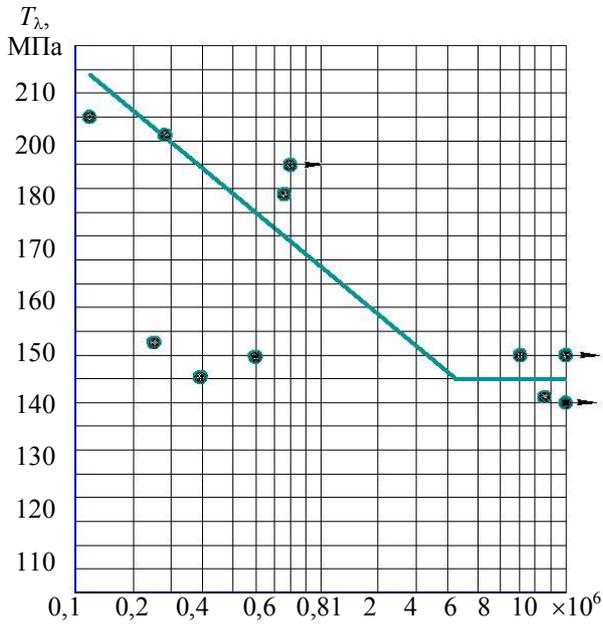
а – пружины с ТДО, $T_n = 1020$ °С, $T_{отп} = 460$ °С, степень деформации наружных волокон 15 %; б – пружины с обычной термообработкой $T_{зак} = 860$ °С, $T_{отп} = 460$ °С. Сталь 60С2А; напряжение испытания 900 МПа

Сравнение полученных кривых показывает насколько отличается величина разрушающих напряжений при одинаковых условиях испытания у пружин, произведенных по технологии обычной горячей навивки и технологии формирования наноразмерной субструктуры.

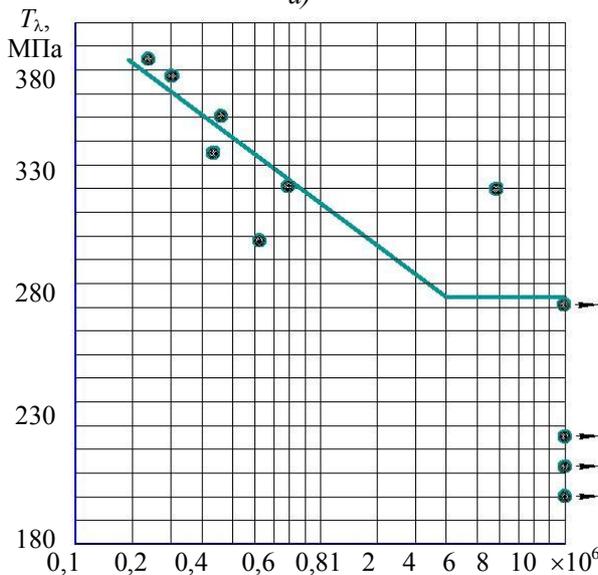
О влиянии субструктуры, имеющей наноразмеры, полученной при ТДО проволоки, свидетельствуют и результаты усталостных испытаний винтовых пружин навитых из неё (рис.8). Также, как и у пружин горячей навивки установлено значительное увеличение ограниченной долговечности при напряжениях, превышающих предел усталости.

ТДО может применяться в качестве упрочняющей операции при изготовлении различ-

ных цилиндрических деталей, испытывающих в эксплуатации контактные циклические нагрузки-валки станов холодной прокатки, бандажи колес транспортных средств, катки гусеничной техники и т.д.



а)



б)

Рис. 7. Результаты испытания на усталость внутренних пружин:

а – технология горячей навивки; б – ТДО

Исследования контактно-усталостной прочности проводилось на опытных образцах валков станов холодной прокатки.

Заготовки валков с припуском на обжатие нагревались токами высокой частоты, деформировались обкаткой на специальном оборудовании до требуемого размера. Изменение параметров оборудования (частота тока, скорость продольного перемещения заготовки

через деформирующее устройство) позволило получать упрочненный слой различной глубины, включая и упрочнение всего поперечного сечения.

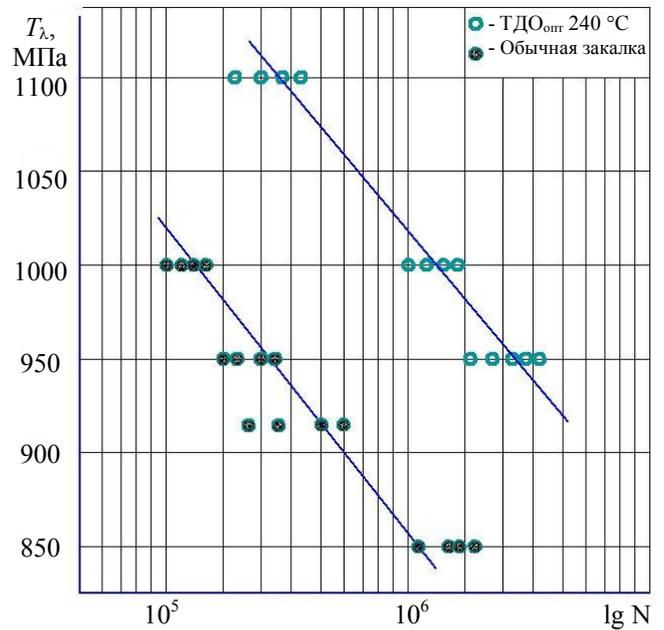


Рис. 8. Кривые усталости винтовых цилиндрических пружин (проволока из стали 51ХФА)

Из валка, прошедшего ТДО, вырезались образцы в виде ролика, которые испытывались на специальном стенде. Схема нагружения приведена на рис. 9.

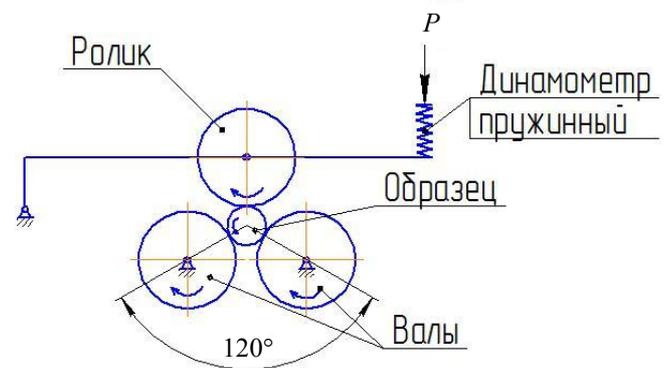


Рис. 9. Схема нагружения образца при испытании на контактную усталость

Результаты испытаний приведены на рис. 10.

Из него следует, что обычно применяемые способы упрочнения – объемная закалка с печного нагрева и поверхностная закалка токами высокой частоты – обеспечивают практически одинаковую и прочность (предел контактной усталости) и долговечность, при циклических контактных нагрузках.

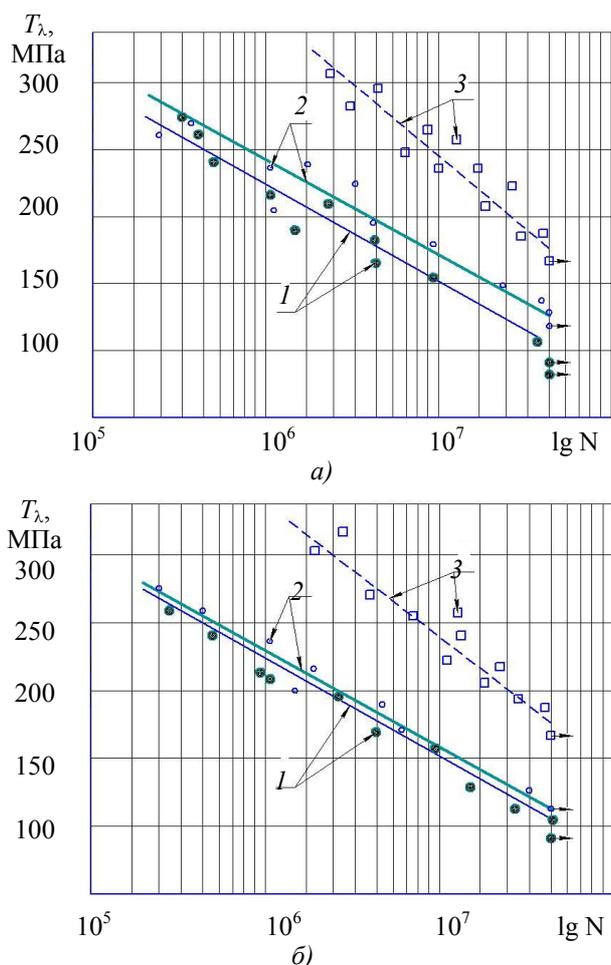


Рис. 10. Результаты испытаний на контактную усталость образцов стали 9Х (а) и 3Х15 (б)

После ТДО, в результате которой в металле поверхностного слоя валка формируется субструктура, имеющая размеры менее 100 нм (см. рис. 4), усталостная прочность при контактном нагружении существенно увеличивается, предел контактной усталости на базе $5 \cdot 10^7$ циклов увеличивается с 1150 МПа до 1700 МПа у образцов из стали 9Х и с 1200 МПа до 1800 МПа у стали 3Х15, а ограниченная долговечность при $\sigma_k = 2000$ МПа у образцов из стали 9Х увеличивается в 11,2 раза (с $2,5 \cdot 10^6$ циклов до $3,1 \cdot 10^7$ циклов).

Выводы

1. В конструкционных сталях и деталях машин наноразмерная структура формируется при термомеханической обработке, включающей индукционный нагрев, относительно небольшие деформации и регламентированное охлаждение.

2. Термомеханическая обработка может применяться при изготовлении цилиндрических винтовых пружин холодной и горячей навивки, а также цилиндрических деталей, испытывающих в эксплуатации циклические нагрузки.

3. Ограниченная долговечность пружин горячей и холодной навивки при циклическом сжатии увеличивается не менее чем в 10 раз. Также увеличивается ограниченная долговечность образцов валков станов холодной прокатки из стали 9Х и 3Х15 при контактной усталости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лякишев, Н.П., Алымов, М.И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. – 2006. Т. 1. – № 1-2. – С. 71.
2. Valiev R.Z., Alexandrov J.V., Zhu Y.T., Towe T.C. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // J. Mater. Res. 2002. V. 17. P. 5.
3. Valiev R.Z. Nanomaterial advantage // Nature. 2002. V. 419. P. 887-889.
4. Шаврин, О.И. Формирование наноразмерной структуры в материале деталей машин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. Вып. 1. – С. 4–6.
5. Шаврин, О.И. Высокопрочные пружины для подвижного состава железных дорог // Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог. – 2012. Вып. 3. – С. 71–80.
6. Shavrin O.I. Influence Of Nanotechnology On Coiled Springs Operational Characteristics // Nanostructures, Nanomaterials and Nanotechnologies to Nanoindustry. 2014. P. 260–272.
7. Shavrin O.I., Scvortsov A.N., Maslov L.M. Manufacturing schemes of nanoscale structure formation in machine parts // Machines, Technologies, Materials. 2015. Iss. 6. P. 34–37.
8. Шаврин, О.И., Маслов, Л.Н., Лукин, Л.Л. Влияние термомеханической обработки на субструктуру и прочностные характеристики пружинных сталей // Российские нанотехнологии. – 2016. V. II. – №3–4.
9. Роль дислокаций и упрочнения в разрушении металлов / под ред. В.С. Ивановой. – М.: Наука, – 1965. – 180 с.
10. Бернштейн, М.Л., Займовский, В.А., Капуткина, Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, – 1983. – 480 с.

REFERENCES

1. Lyakishev, N.P., Alymov, M.I. Nano-materials of structural purpose // Russian Nanotechnologies. – 2006. Vol. 1. – № 1-2. – pp. 71.
2. Valiev R.Z., Alexandrov J.V., Zhu Y.T., Towe T.C. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // J. Mater. Res. 2002. V. 17. P. 5.
3. Valiev R.Z. Nanomaterial advantage // Nature. 2002. V. 419. P. 887-889.
4. Shavrin, O.I. Formation of nano-dimension structure in material of machinery // Bulletin of Izhevsk Technical University. – 2011. Issue 1. – pp. 4–6.
5. Shavrin, O.I. High-strength springs for rolling-stock // Bulletin of Natural Monopoly Institute: Railway Equipment. – 2012. Issue 3. – pp. 71–80.
6. Shavrin O.I. Influence Of Nanotechnology On Coiled Springs Operational Characteristics // Nanostructures, Nanomaterials and Nanotechnologies to Nanoindustry. 2014. P. 260–272.
7. Shavrin O.I., Scvortsov A.N., Maslov L.M. Manufacturing schemes of nanoscale structure formation in machine parts // Machines, Technologies, Materials. 2015. Iss. 6. P. 34–37.
8. Shavrin, O.I., Maslov, L.N., Lukin, L.L. Thermomechanical treatment influence upon substructure and spring steel strength characteristics // Russian Nanotechnologies. – 2016. V. II. – №3–4.
9. Role of Dislocation, Strengthening and Metal Destruction/ under the editorship of V.S. Ivanova. – M.: Science, – 1965. – pp. 180.
10. Bernstein, M.L., Zaimovsky, V.A., Kaputkina, L.M. Steel Thermomechanical Treatment. – M.: Metallurgy, – 1983. – pp. 480.

Рецензент д.т.н. В.А. Дёмин

УДК 621.923.6.025
DOI: 10.12737/20594

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

Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации

Рассмотрены проблемы снижения водородного изнашивания стальных деталей, работающих в водородной среде. Проведены высоковакуумный отжиг и имплантация ионов кремния в поверхность стальных образцов. Приведены технология и режимы высоковакуумного отжига ионной имплантации кремния. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения фазовой структуры поверхностного слоя.

Ключевые слова: высоковакуумный отжиг; ионная имплантация; фазовое превращение; поверхностное упрочнение.

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

Structure formation in surface layer of machine parts by methods of high-vacuum annealing and ion implantation

This paper reports the problems of hydrogen wear decrease in steel parts operating in hydrogen medium. The friction couples of particular machine parts subjected to hydrogen wear are shown. Steel grades of the samples analyzed and their hardness are pointed out. The technologies of high-vacuum annealing and ion implantation used in investigations are described. The modes for the carrying out of high-vacuum annealing and ion implantation of silicon into a surface of the samples investigated are presented. It is determined that in a surface layer after the carrying out of high-vacuum annealing and ion implantation appear new structures with their form similar to roundish spots. The dimensions of spots and their distribution according to depth are defined. The sample breaking tests are carried out. It is established that technological operations carried out affect only the surface layers of samples. The investigation results can be used at the analysis of methods for hydrogen wear decrease of parts operating in hydrogen medium.

Keywords: high-vacuum annealing; ion implantation; phase change; surface strengthening.

В большинстве случаев, наряду с другими видами изнашивания [1, 2] в процессе трения деталей машин активное участие принимает водород. Водород присутствует, как и в смазывающих материалах, так и в окружающей среде и в самих трущихся деталях. Однако когда детали пар трения работают в углеводородных средах, зачастую водородное изнашивание становится основной причиной выхода из строя узлов трения. Для снижения негативного воздействия водорода, зачастую, применяют специальные чугуны с графитосодержащей структурой. Такие чугуны более устойчивы к водородному изнашиванию, по сравнению со сталями, в следствии наличия сложной кристаллографической структуры. Однако в некоторых случаях там, где это целесообразно, используются детали, изготовленные из сталей [3].

Исследованию воздействия водородного изнашивания стали посвящено большое количество работ [4, 5]. В научной литературе неоднократно приводятся исследования посвященные повышению водородной стойкости стальных деталей при трении. Однако значительная часть этих исследований обсуждает детали узлов трения, работающих в вакуумной среде [6, 7], где водородное изнашивание наиболее актуально. В то же время, немалая часть узлов трения, работающих в условиях водородосодержащей среды, также в значительной мере подвержено водородному изнашиванию.

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 водород-

ному изнашиванию являются зубья шестерен [8]. В связи со сложным профилем зубьев их поверхностное упрочнение носит весьма затруднительный характер, что еще обусловлено и тем, что качество поверхности зуба должно соответствовать требованиям нормативных документов.

Незначительные отклонения в профиле зуба или качестве его поверхности приводит к сильным шумам при эксплуатации. Так, на некоторых промышленных предприятиях используются шестеренные 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 исследование способов повышения водородной стойкости зубьев стальных шестерен, без «ущерба» профилю зуба, имеет научно-практическое значение.

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования повышения водородной стойкости стальных деталей совокупностью методов высоковакуумного отжига и ионной имплантации. Образцы были изготовлены из сталей марок 45 и 40х и закалены до твердости 48...52 HRC. Высоковакуумный отжиг проводился на установке [5], схема которой приведена на рис. 1.

Перед загрузкой образцов в камеру они промывались бензином и четыреххлористым углеродом. После этого камера герметизировалась и проводилась откачка воздуха до давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па. При достижении вакуума в $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па включалась электропечь и камера разогревалась до температуры 523 К. О начале десорбции водорода из образцов судили по падению давления в камере. При достижении вакуума $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па при температуре 523 К электропечь выключалась, и при достижении температуры в камере 293 К в нее запускался воздух.

Приведенная технология высоковакуумного отжига снижает концентрацию водорода в поверхностном слое материала [9]. Однако, согласно [5], через некоторое время в условиях покоя концентрация водорода восстанавливается вследствие его десорбции из глубины материала в поверхностный слой. В этой связи, необходимо заполнить образовавшиеся при десорбции водорода «вакансии» до восстановления его концентрации во всем объеме образца.

Одним из элементов, способных снизить водородное изнашивание, является кремний.

Кремний имеет ионный радиус $42(+4e)271(-4e)$ пм, и при взаимодействии с углеродом образует карбиды. Внедрение ионов кремния в структуру кристаллической решетки после высоковакуумного отжига позволит не только создать карбиды в поверхностном слое, но и дает возможность ионам кремния занять вакансии, образовавшиеся после десорбции водорода. Энергия связи и коэффициент диффузии ионных пар определяются обоими ионами (рис. 2). Имплантация ионов кремния проводилась при следующих параметрах: энергия ионов $E = 400$ кэВ; плотность тока ионного пучка $j = 60$ мкА/см²; доза облучения $Q = 1000$ мкКул /см²; угол наклона ионного пучка 7° . Расширение кристаллической решетки β_V производилось в камере под действием температуры 457 К.

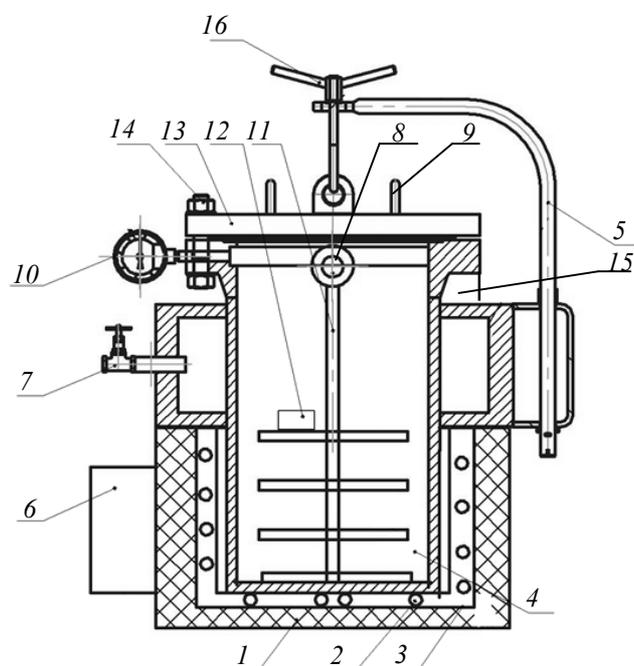


Рис. 1. Установка высоковакуумного отжига:

1 – корпус; 2 – ТЭН; 3 – теплоизоляционная обшивка; 4 – вакуумная камера; 5 – безмасленный насос; 6 – турбомолекулярный насос затвора вакуумного прогревочного; 7 – прогревочный вакуумный затвор; 8 – клапан; 9 – вакуумметр; 10 – датчик давления; 11 – пневмопривод; 12 – образец; 13 – крышка; 14 – винты; 15 – блок управления; 16 – рукоятка сброса давления

Во время исследований, с целью выявления структуры поверхности, обнаружены пятна округлой формы (рис. 3). Данные пятна, вероятнее всего, являются скоплением кремния в дефектах кристаллической решетки, образовавшихся после высоковакуумного отжига.

Средний диаметр пятен колеблется в пределах 20...25 нм. Целью дальнейших исследований стало изучение параметров данных пятен и их влияние на свойства материала.

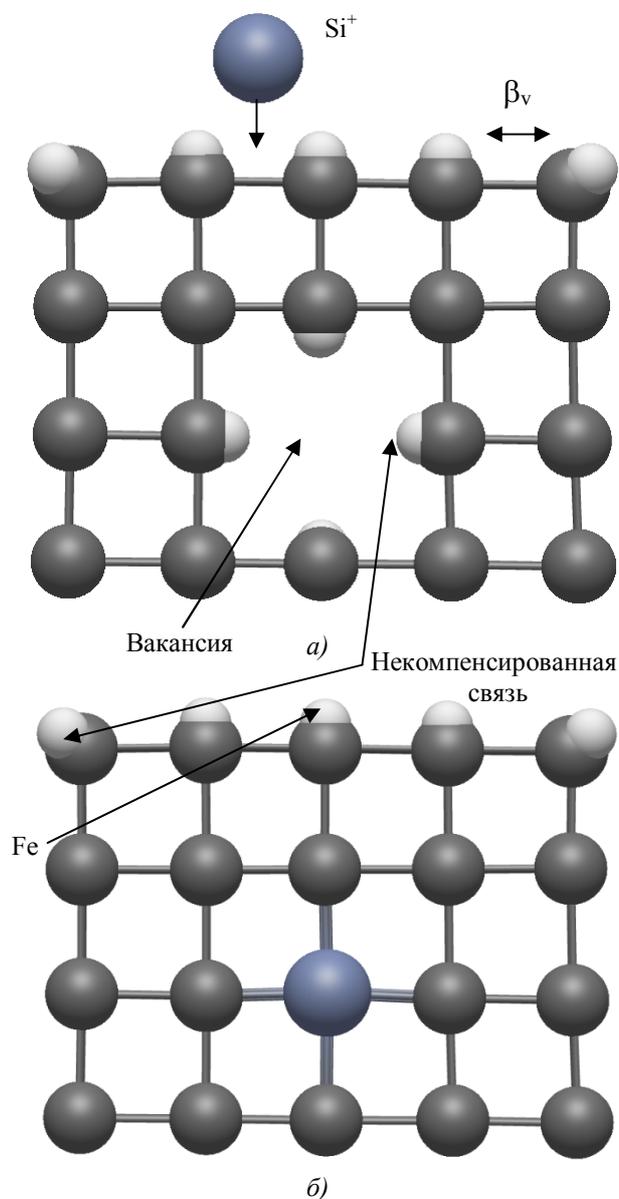


Рис. 2. Схема имплантации иона кремния:
 а – имплантация иона кремния в кристаллическую решетку стали; б – занятие вакансии ионом кремния

С целью выявления влияния образовавшейся структуры на свойства детали были проведены испытания образцов на разрыв. Так, образцы, подвергнутые только термической обработке имели $\sigma_{0,2} = 770...790$ МПа, легированные кремнием – $\sigma_{0,2} = 780...810$ МПа, что подтверждает заключение о влиянии проведенных технологических операций только лишь на качество поверхностного слоя образцов.

Согласно проведенным расчетам глубина измененного слоя составляет 0,87 мкм. Учитывая, что имплантируемые ионы кремния внедряются в материал на глубину от 0,01 до 1,0 мкм, а также то, что распределение ионов имплантированного вещества по глубине по форме близко к гауссовскому распределению, можно утверждать, что наибольшей концентрации имплантированные ионы кремния достигают на глубине $\approx 0,43$ мкм.

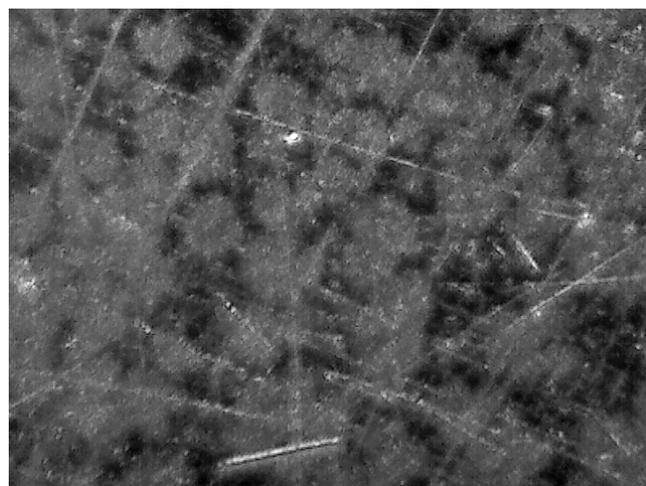


Рис. 3. Микршлиф поверхности после высоковакуумного отжига и имплантации кремния

Таким образом, реализация предлагаемой технологии позволяет создать в поверхностном слое структуру по форме напоминающую скопление пятен, однако, для более детального изучения образовавшейся структуры необходимо провести исследования на микротвердость, изнашивание, структурный состав и физические свойства.

Следует учесть, что внедрение ионов в кристаллическую решетку материала приводит к появлению дефектов структуры. Выбитые из узлов решетки атомы железа приводят к образованию вакансий и дефектов структуры в виде внедренных межузельных атомов. Эти же дефекты возникают при застревании между узлами решетки ионов кремния. Такие дефекты образуют дислокации и целые дислокационные скопления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов А.Г., Богомолов Д.Ю., Шалыгин М.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – №4. – С. 7-10.

2. Суслов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г. Адгезионный износ поверхности трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – №7. – С. 29-31.

3. Рахмилевич З.З. Насосы в химической промышленности. – М.: Химия, 1990. – 240 с.

4. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). – М.: МСХА, 2001. – 616 с.

5. Защита от водородного износа в узлах трения / Колл. авт.; под. ред. А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 135 с.

6. Невшупа Р.А. Научные основы управления процессами трибодесорбции газов в узлах трения механизмов сверхвысоковакуумного оборудования электронной техники и нанотехнологий: дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2010. – 671 с.

7. Клямкин С.Н. Неравновесные состояния и гистерезис сорбции-десорбции водорода в водородаккумулирующих материалах: дис. ... д-ра хим. наук. – Москва, 2014. – 246 с.

8. Шалыгин М.Г. Водородное и абразивное изнашивание поверхностей деталей насосов при перекачивании углеводородов // Строительные и дорожные машины. – 2014. – №4. – С. 27–30.

9. Матюшенко В.Я., Соловей Н.Ф., Тороп В.В. Исследование водородного износа цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания // Эффект безызносности и триботехнологии. – 1997. – № 1. – С. 33–39.

REFERENCES

1. Suslov A.G., Bogomolov D.Yu., Shalygin D.G. Friction surface fatigue wear at subroughness level // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2015. – №4. – pp. 7-10.

2. Suslov A.G., Poroshin V.V., Shalygin M.G. Friction surface adhesive wear at subroughness level // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2015. – №7. – pp. 29-31.

3. Rakhmievich Z.Z. *Pumps in Chemical Industry*. – M.: Chemistry, 1990. – pp. 240.

4. Garkunov D.N. *Tribotechnology (Wear and Wearlessness)*. – M.: MAA, 2001. – pp. 616.

5. *Protection against Hydrogen Wear in Friction Units* / Group of authors; under the editorship of A.A. Polyakov. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp.135.

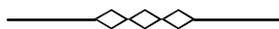
6. Nevshupa R.A. *Scientific Fundamentals in Processes of Gas Tribodesorption in Friction Units of Mechanisms of Super-vacuum Equipment of Electronic Technics and Nanotechnologies*: Thesis for a Doctor's degree. – Moscow, 2010. – pp. 671.

7. Klyamkin S.N. *Nonequilibrium States and Hysteresis of Hydrogen Sorption-Desorption in Hydrogen Accumulating Materials*: Thesis for a Doctor's degree. – Moscow, 2014. – pp. 246.

8. Shalygin M.G. Hydrogen and abrasion of pump part surfaces at hydrocarbon transfer // *Construction Site Engines and Road Machinery*. – 2014. – №4. – pp. 27–30.

9. Matyushenko V.Ya., Solovey N.F., Torop V.V. Investigation of hydrogen wear in piston-cylinder-unit of internal combustion engines // *Effect of Non-wear and Tribotechnology*. – 1997. – № 1. – pp. 33–39.

Рецензент д.т.н. А.Ю. Албагачиев



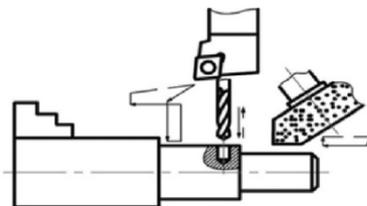
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

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 621.9.079
DOI: 10.12737/20595

**Е.М. Булыжев, д.т.н.,
Л.В. Худобин, д.т.н.**
(Ульяновский государственный технический университет)
E-mail: ecovita05@mail.ru; kafedra_tm@ulstu.ru

Высокопроизводительные намывные фильтры

Сопоставлены технические характеристики объемных и намывных (тонкослойных) фильтров, предназначенных для очистки от механических примесей водных технологических жидкостей и воды. Выявлены направления совершенствования намывных фильтров и предложены схемотехнические решения намывных ламельных фильтров, обеспечивающих тонкую очистку больших объемов и расходов водных жидкостей. Приведена конструкция опытного безнапорного ламельного фильтра высокой производительности.

Ключевые слова: водная технологическая жидкость; фильтр; ламель; механические примеси; взвеси; намывной фильтровальный слой.

**E.M. Bulyzhev, D.Eng.,
L.V. Khudobin, D.Eng.**
(Ulyanovsk State Technical University)

Highly productive precoat filters

The performance attributes of depth filters and precoat (thin-layer) ones intended for the purification of water technological liquids and water from mechanical impurities are compared. The trends for precoat filter updating the circuit solutions of precoat lamellar filters ensuring fine cleaning of large volumes and consumptions of water liquids are revealed. The design of a prototype gravity lamellar filter of high efficiency is shown.

Keywords: water technological liquid; filter; lamella; mechanical impurities; dredges; precoat filtered layer.

В шестидесятые годы прошлого столетия при переводе металлообрабатывающего технологического оборудования на обеспечение оборотными водными технологическими жидкостями (ВТЖ), прежде всего смазочно-охлаждающими (СОЖ), перед промышленными машиностроительными и металлургическими предприятиями встали задачи, до конца не решенные до настоящего времени: потребовались новые технологии и реализующие их системы качественной очистки больших объемов и расходов ВТЖ (до сотен тысяч кубометров в сутки). Разработка таких технологий, ликвидирующих сбросы загрязненных жидкостей в стоки, невозможна без решения проблемы тонкой очистки больших объемов ВТЖ от механических примесей. Как правило, в системах оборота ВТЖ объединяют десятки и

сотни единиц однотипного технологического оборудования. Чем больше производительность единичного фильтровального оборудования, тем легче реализуются такие технологии.

Наиболее широко для этих целей используют напорные и безнапорные объемные фильтры (рис.1, а, б). Напорные объемные фильтры обеспечивают скорости фильтрации до 1 м/ч. Обработка ВТЖ и воды коагулянтами и флокулянтами позволяет повысить скорость фильтрации до 9...10 м/ч. Объемные фильтры, реализующие такой технологический прием, получили название скорых напорных фильтров. Удельная производительность фильтров на 1 м² площади сечения фильтровальной загрузки (часовая удельная гидравлическая нагрузка) составляет 9...10 (м³/ч)м².

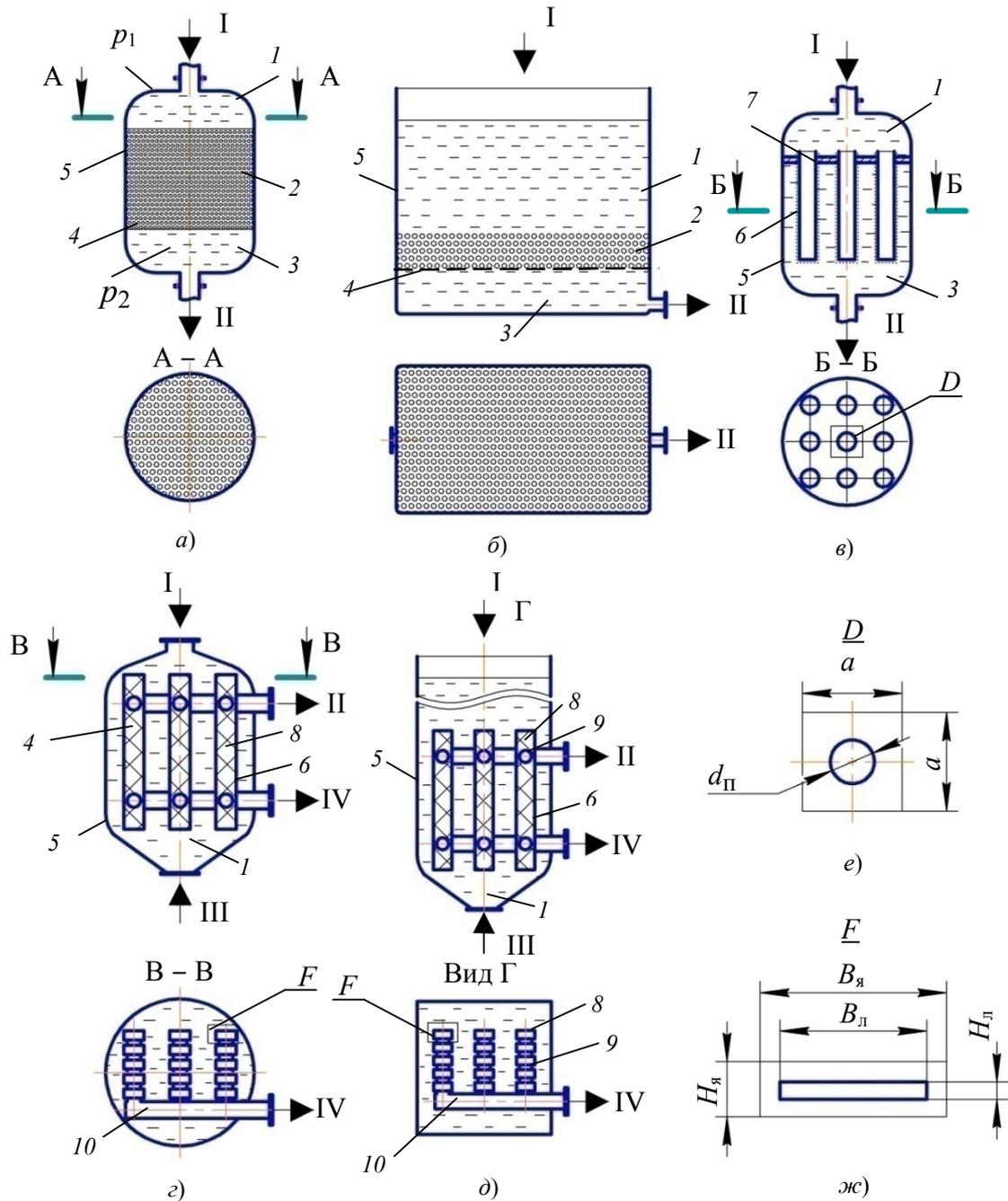


Рис 1. Схемы фильтров:

a и б – объемные напорный и безнапорный; *в* – патронный напорный; *г и д* – ламельные намывные напорный и безнапорный; *е, ж* – элементарная структурная ячейка в плане патронного напорного и ламельного фильтров: d_n – диаметр патрона; a – размер ячейки патронного фильтра; $B_я, H_я$ – размеры ламели; $B_я, H_я$ – размеры ячейки ламельного фильтра; I, II – вход и выход ВТЖ; III, IV – отвод и подвод промывочной воды; 1 – полость с исходной водой; 2 – слой загрузки; 3 – полость с очищенной водой; 4 – поддерживающая сетка; 5 – корпус; 6 – намывной слой; 7 – патрон; 8 – ламель; 9 – секция ламелей; 10 – коллектор

Цилиндрический корпус объемного скорого напорного фильтра разделяют горизонтальной перфорированной перегородкой 1 на две полости (рис. 1, *a*): в верхней полости I размещен слой гранулированной загрузки 2, а в нижней полости 3 собирается фильтрат. Загрязненная вода или ВТЖ подается в верхнюю полость

под давлением p_1 , в нижней полости, где собирается фильтрат, давление p_2 значительно меньше. Таким образом создается перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2$ (напор). Периодически загрузка промывается водой при ее движении из нижней полости в верхнюю. При этом слой загрузки псевдооживается (взвешивается),

что облегчает его промывку от осадка механических и иных примесей. Основное отличие безнапорного объемного фильтра (рис. 1, б) от напорного заключается в том, что перепад давления в нем определяется только толщиной слоя жидкости над загрузкой (до шести метров).

В объемных фильтрах частицы примесей осаждаются на поверхности зерен фильтровальной загрузки [1, 2]. Наряду с существенными достоинствами (достаточно высокое качество очистки, повышенная надежность, простота конструкции, долговечность и др.) им присущи серьезные недостатки, в особенности большие габаритные размеры сооружений, обусловленные низкой удельной часовой гидравлической нагрузкой (в расчете на один квадратный метр площади производственных помещений) комплексов скорых напорных фильтров (СНФ), не превышающей $2 \text{ (м}^3/\text{ч)/м}^2$. Это обусловлено низкой производительностью единичного фильтровального оборудования.

В настоящее время процесс совершенствования скорых напорных фильтров приостановился. Однако, как следует из выражения (1) (см. далее), возможен и другой прием – увеличение площади фильтрования S посредством увеличения удельной фильтровальной площади $S_{\text{фуд}}$. Расчеты авторов показывают, что реализация такого приема в тонкослойных фильтрах, например, в намывных, может обеспечивать разработку фильтров с $S_{\text{фуд}}$ до сотен $\text{м}^2/\text{м}^2$.

Напорный намывной патронный фильтр (НПФ) (рис. 1, в) имеет многократно большую площадь фильтрования, чем объемные фильтры [3, 4, 5]. Вода из пространства I между цилиндрическими патронами проходит через предварительно намытый на поверхности патронов фильтрующий слой 2 во внутренние полости патронов, затем поднимается в верхнюю зону фильтра 3 и выходит в трубопровод. Намывной слой состоит из тонкодисперсного материала – кварцевых или диатомитовых порошков.

Напорные намывные ламельные фильтры (рис. 1, г и д) отличаются от патронных фильтров тем, что их фильтровальные элементы, так называемые ламели (рис. 2), имеют, как правило, в сечении вытянутую по одной координате прямоугольную форму. Благодаря чему, во-первых, значительно увеличивается фильтровальная площадь каждого элемента, а во-вторых, обеспечивается возможность расположения в единице объема фильтра боль-

шого числа ламелей, что также ведет к значительному увеличению фильтровальной площади всего фильтра, а значит и к соответствующему повышению производительности [6, 7, 8].

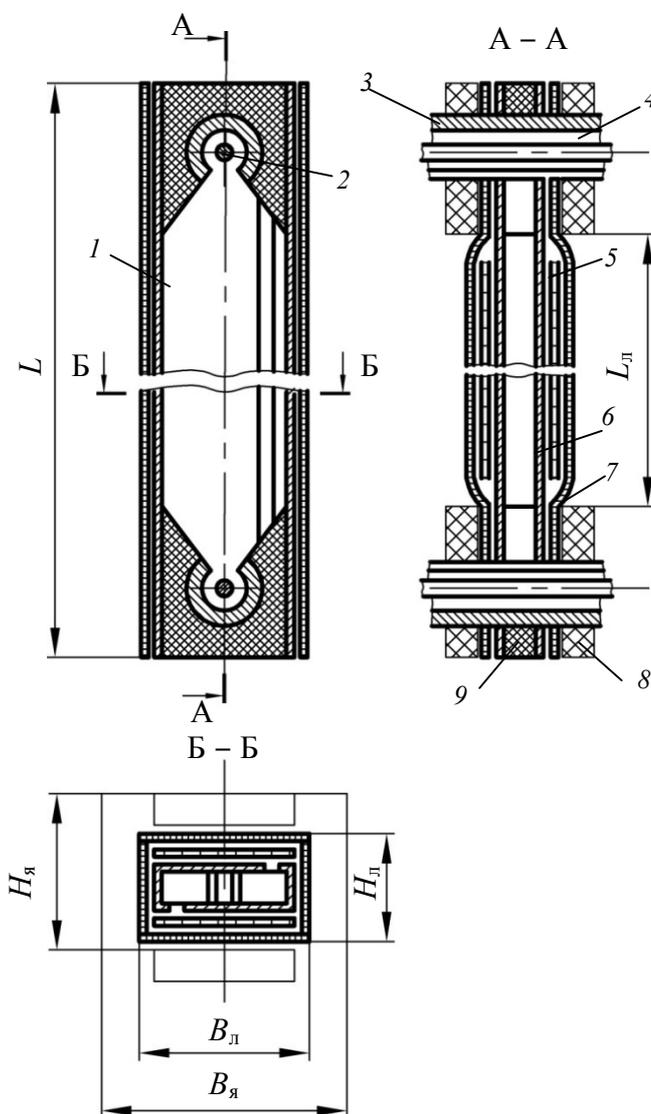


Рис 2. Схема фильтровальной ламели:

- 1 – полость ламели; 2 – шпилька; 3 – коллектор;
- 4 – полость коллектора; 5 – сетка поддерживающая;
- 6 – профиль гнутый; 7 – коллекторная сетка; 8 – сухарь;
- 9 – вкладыш

Корпус фильтровальной ламели данной конструкции, образован двумя гнутыми профилями 6 шириной 60 мм и длиной 2 м из листовой нержавеющей стали толщиной $0,5 \text{ мм}$. В отверстия корпуса ламели установлены два трубчатых коллектора 3 с продольным пазом. Между ламелями вставлены пластмассовые сухари 8 . Внутри ламелей с торцов установлены С-образные фигурные вкладыши 9 , соединяющие внутреннюю полость 1 ламели с полостью 4 коллектора.

По широким сторонам корпуса проложены полосы из коллекторной сетки 7 с ячейкой $1,5 \times 1,5$ мм. Снаружи ламели обтянуты поддерживающей сеткой 5 из синтетического материала с ячейкой 35×35 мкм. Ламели стягивают в секции с помощью шпильки 2. Перепад давления в безнапорном ламельном фильтре, как и в объемных безнапорных фильтрах, определяется толщиной слоя воды над ламелями. Преимуществом безнапорного фильтра является простота удаления с поверхностей ламелей отработанного намывного слоя δ (рис. 1, з и д) с осадком.

Напорные и безнапорные ламельные фильтры работают соответственно при давлении $1,5 \dots 2,5$ и $0,3 \dots 0,6$ бар. Ламельные напорные фильтры предпочтительно эксплуатировать в интервале перепада давления $0,6 \dots 1,5$ бар, а безнапорные – $0,4 \dots 0,5$ бар.

Производительность единичных фильтров Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) зависит от скорости фильтрации v ($\text{м}/\text{ч}$) и площади фильтрующего элемента S (м^2):

$$Q = Sv = S_{\text{фуд}} S_{\text{г}} v, \quad (1)$$

где $S_{\text{г}}$ – площадь горизонтальной (поперечной) проекции рабочего объема фильтра, м^2 ; $S_{\text{фуд}}$ – удельная фильтровальная площадь, приходящаяся на единицу площади горизонтального сечения $S_{\text{г}}$, $\text{м}^2/\text{м}^2$.

В соответствии с уравнением Дарси [2] можно записать

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v dS}{dt} = \frac{\Delta p \cdot S(t)}{\eta [R_{\text{ф}} + R_{\text{ос}}(t)]}, \quad (2)$$

где $\frac{dv}{dt}$ – дифференциал приращения объема фильтрата, м^3 ; Δp – перепад давления с обеих сторон фильтровальной перегородки, Па; η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; $R_{\text{ф}}$ и $R_{\text{ос}}(t)$ – сопротивление фильтровальной перегородки и осадка на ее поверхности, $1/\text{м}$.

Уравнение (2) позволяет оценить значение перепада давления Δp для повышения производительности фильтрации.

Технические характеристики объемных и намывных фильтров

В процессе фильтрации на поверхности фильтровальной перегородки любого фильтра постепенно образуется слой осадка, в поры фильтра попадают частицы загрязнений фильтруемой жидкости, а площадь проходного сечения фильтра уменьшается. Вследствие

этого возрастает сопротивление фильтровальной перегородки, что на практике преодолевается повышением перепада давления Δp и соответствующим увеличением скорости фильтрации v , т. е. скорости движения жидкости через фильтровальную перегородку (см. (1) и (2)).

Однако вследствие сжимаемости осадка его сопротивление возрастает нелинейно. Также нелинейно, но с некоторым отставанием возрастает скорость v (рис. 3). При достижении определенного значения Δp приращение скорости фильтрации практически прекращается.

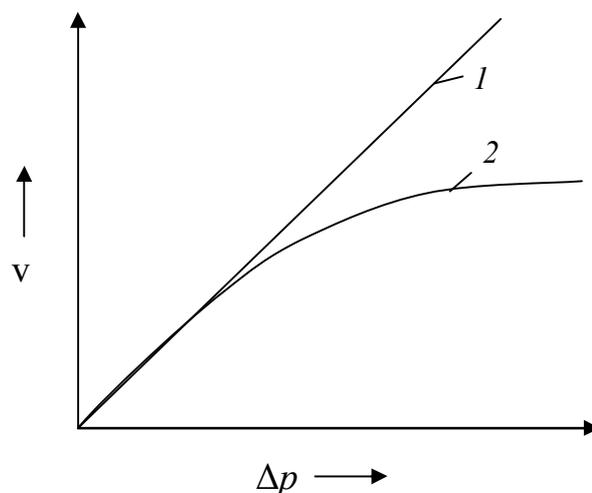


Рис 3. Зависимость скорости фильтрации v от перепада давлений Δp (принципиальный график): 1, 2 – идеальная и фактическая зависимости

Естественно, закономерное уменьшение скорости фильтрации v (до регенерации фильтровальных элементов путем промывки) приводит к соответствующему снижению производительности фильтра Q (рис. 4).

Чтобы обеспечить постоянство заданной производительности фильтра Q_3 в течение всего рабочего цикла $t_{\text{ц}}$ используют следующее решение: в течение первой части рабочего цикла длительностью $t_{\text{ц1}}$ фактическая производительность превышает заданную Q_3 ; избыток чистой жидкости (ВТЖ или воды) направляется в резервную емкость, установленную рядом с фильтром; в течение второй части рабочего цикла длительностью $t_{\text{ц2}}$ фактическая производительность меньше заданной, а "недостаток производительности" фильтрации компенсируется дополнительной подачей чистой жидкости из резервной емкости. Подачу воды в первой части цикла следует производить насосом с переменной и управляемой производительностью.

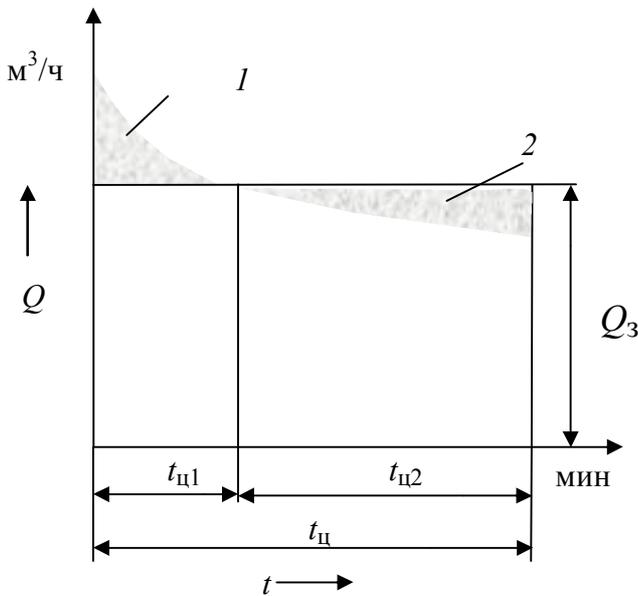


Рис. 4. Зависимость фактической производительности фильтра Q от времени фильтрации t :
1, 2 – зоны избыточной и недостаточной производительности

Значение удельной фильтровальной площади $S_{фуд}$ объемных фильтров близко к единице, а их производительность Q ограничена, как отмечено выше, скоростями фильтрации порядка 8...9 м/ч. Элементарная ячейка патронного фильтра в плане показана на рис. 1, е. $S_{фуд}$ намывных фильтров в десятки раз превышает этот показатель объемных фильтров и составляет 10...50 м²/м² [4, 6]. Толщина фильтрующего намывного слоя, через который движется водная жидкость, не превышает 2...3 мм, тогда как толщина слоя нагрузки объемных фильтров (см. рис. 1, а и б) достигает 800...1000 мм.

Тем не менее, намывные фильтры обеспечивают высокую степень и тонкость очистки, поскольку намывной слой создается из зерен микропорошков с диаметром фракций 50...100 мкм, при относительно небольших скоростях фильтрации (0,5...2,0 м/ч) в зависимости от перепада давления (0,6...1,5 бар). Такие небольшие по сравнению с напорными объемными фильтрами скорости фильтрации объясняются большей сжимаемостью осадка в связи с малыми размерами его частиц и их низкой плотностью ($\rho_{г} = 1,05...1,2$ кг/дм³). Относительно низкие значения скорости фильтрации водных жидкостей в намывных фильтрах с успехом компенсируются большими значениями удельной фильтровальной площади.

Известные конструкции намывных патрон-

ных фильтров (см. рис. 1, в) имеют несколько принципиальных недостатков, препятствующих созданию единичных аппаратов высокой производительности (до 4000...5000 м³/ч):

1) сложность рабочих циклов и соответственно управления ими;

2) малая длительность рабочего цикла, что приводит к необходимости частых промывок и переналадок и к повышенному расходу промывочной воды (до 10 – 12 % от объема очищенной воды);

3) ограниченные значения удельной фильтровальной площади, обусловленные небольшой длиной патронов (не более одного метра). Это ограничение связано с особенностями организации их промывки – сложностью обеспечения противоположно направленного потока (противотока) жидкости из осевых отверстий патронов по всей их длине.

Первый и второй из указанных выше недостатков технически преодолимы, благодаря развитию средств автоматизации управления, третий недостаток преодолеть достаточно сложно.

Известны также намывные фильтры с фильтровальными элементами в виде полых пластин (листов), обтянутых снаружи фильтровальным материалом. Их применение в конструкциях напорных фильтров ограничено низкими прочностными характеристиками пластин при их больших размерах и сложностью организации их промывки [8].

Задача эффективной промывки намывных ламельных фильтров решается проще, поскольку разработанные ламели имеют достаточно прочную и жесткую конструкцию и малые размеры по ширине, благодаря чему они выдерживают повышенное давление при промывке. Элементарная ячейка ламельного фильтра в плане показана на рис. 1, ж, а конструкция ламели – на рис. 2.

Обобщенные технические характеристики объемных и намывных фильтров напорного и безнапорного исполнения представлены в табл. 1.

К таким характеристикам фильтров относятся:

– площадь горизонтальной проекции рабочего пространства фильтра $S_{г}$ м²:

$$S_{г} = L_{ф} B_{ф},$$

где $L_{ф}$, $B_{ф}$ – длина и ширина горизонтальной проекции рабочего пространства, м;

– удельная фильтровальная площадь $S_{фуд}$:

$$S_{фуд} = S_{ф.ед} S_{г}^{-1}, \quad (3)$$

где $S_{ф.ед}$ – фильтровальная площадь единичного аппарата, м²;

1. Технические характеристики объемных и намывных фильтров при очистке воды и ВТЖ от механических примесей: $\eta = 0,001$ Па·с; $t = 20$ °С (средние значения)

Технические характеристики	Расчетная зависимость	Символ	Размерность	Фильтры				
				объемные		намывные		
				безнапорные	напорные	безнапорные ламельные	напорные ламельные	напорные патронные
Площадь горизонтальной проекции рабочего пространства		S_r	м ²	До 200	5,3	6,0	6,0	1,0
Удельная фильтровальная поверхность	(3)	$S_{ф.уд}$	м ² /м ²	1,0	1,0	400	400	75
Толщина фильтрующего слоя		$H_{ф.}$	м	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0
Средний размер частиц загрузки		\bar{d}	мкм	1000	1000	40	40	40
Фильтровальная площадь единичного аппарата	(4)	$S_{ф.ед}$	м ²	200	5,3	2400	2400	75
Перепад давления		Δp	бар	0,6	2,5	0,6	1,2	1,2
Скорость фильтрования		v	м/ч	3	8	0,9	1,8	1,8
Удельная часовая гидравлическая нагрузка	(6)	q	(м ³ /ч)/м ²	3	8	360	720	135
Производительность единичного фильтра	(1)	Q	м ³ /ч	600	42,2	2160	4320	135
Длина ламели и патрона		$L_{л.}$	м	–	–	2 – 3	2 – 3	1
Суточный выход очищенной ВТЖ или воды	(7)	$Q_{сут}$	м ³ /сут	14400	1017	51840	103680	3240
Концентрация механических примесей в исходной ВТЖ и воде		$C_{пи}$	мг/дм ³	0	0	2,0	2,0	2,0
Концентрация механических примесей в очищенной ВТЖ и воде		$C_{по}$	мг/дм ³	1,0	1,0	0,1	0,2	0,2
Время цикла		$t_{ц.}$	ч	12	12	6	6	3
Коэффициент увеличения площади фильтровальной поверхности *	(8)	K_S	–	1	1	400	400	75
Коэффициент увеличения скорости фильтрования *	(9)	K_v	–	1	4	0,3	0,6	0,6
Коэффициент повышения производительности фильтрования*	(10)	K_Q	–	1	4	120	240	43,8

*Аналогом является фильтровальный аппарат, для которого значения коэффициентов увеличения фильтровальной поверхности, скорости и производительности фильтрования равны 1,0.

$$S_{ф.ед} = S_r \cdot S_{ф.уд}; \quad (4)$$

– производительность единичного фильтра, м³/ч:

$$Q_{ч} = v S_{ф.ед}. \quad (5)$$

– удельная часовая гидравлическая нагрузка q , (м³/ч)/м²:

$$q = v S; \quad (6)$$

– суточный выход очищенной воды или ВТЖ, м³/сутки:

$$Q_{сут} = 24 Q_{ч}. \quad (7)$$

Увеличение фильтровальной площади патронного фильтра по сравнению с объемным

фильтром можно оценить по величине коэффициента K_S из выражения

$$K_S = S_{ф.п} / S_{ф.об}, \quad (8)$$

где $S_{ф.п}$ и $S_{ф.об}$ – соответственно фильтровальная площадь патронного и объемного фильтра, м²:

$$S_{ф.п} = \pi d_{п} L_{р} n_{п};$$

$$S_{ф.об} = \frac{\pi}{4} D_{ф}^2;$$

$$n_{п} = \frac{\pi D_{ф}^2}{4 a^2},$$

где $d_{п}$ – диаметр фильтровального патрона, м; $L_{р}$ – рабочая длина патрона, м; $n_{п}$ – число па-

тронов, шт.; D_{ϕ} – внутренний диаметр объемного фильтра.

Коэффициент плотности компоновки патронного фильтра K_{Π} можно получить из выражения (см. рис. 1, в, е):

$$K_{\Pi} = \frac{\pi d_{\Pi} L_{\Pi}}{a^2},$$

где d_{Π} – диаметр патрона, м; L_{Π} – длина патрона, м; a – длина стороны элементарной ячейки, м.

Например, при $d_{\Pi} = 16$ мм; $L_{\Pi} = 1000$ мм; $a = 24$ мм, коэффициент K_{Π} плотности компоновки патронного фильтра равен 74,3.

Тот же коэффициент для ламельных фильтров можно получить из выражения (см. рис. 1, ж и рис. 2)

$$K_{\Pi} = \frac{2(B_{\lambda} + H_{\lambda})L_{\lambda}}{(H_{\lambda} B_{\lambda})},$$

где L_{λ} , B_{λ} , H_{λ} – длина, ширина и толщина ламели, м; B_{λ} , H_{λ} – размеры элементарной ячейки в плане, м.

При достижимых значениях $H_{\lambda} = 10$ мм; $B_{\lambda} = 170$ мм; $L_{\lambda} = 100$ мм; $H_{\lambda} = 5$ мм; $L_{\lambda} = 2000$ мм коэффициент K_{Π} равен 247,1. Следовательно, K_{Π} у ламельных фильтров в 3–3,5 раза больше чем у патронных фильтров. Кроме того, K_{Π} позволяет оценить увеличение площади ламельных фильтров по сравнению с объемными.

Величина K_{Π} определяется отношением фильтровальной площади ламели к площади элементарной ячейки патрона.

Коэффициент увеличения фильтровальной площади ламельного фильтра по сравнению с патронным фильтром определяется из выражения

$$K_{\Pi\Pi} = \frac{K_{\Pi}}{K_{\Pi}} = \frac{2L_{\lambda}(H_{\lambda} + B_{\lambda})a^2}{H_{\lambda} B_{\lambda} \pi d_{\Pi} L_{\Pi}}.$$

При заданных в проекте фильтра НЛФ-1200-1 (см. далее) значениях размеров ламели $L_{\lambda} = 2$ м; $B_{\lambda} = 0,06$ м; $H_{\lambda} = 0,008$ м; $H_{\lambda} = 0,022$ м; $B_{\lambda} = 0,12$ м и размерах патрона $d_{\Pi} = 0,03$ м; $a = 0,040$ м; $L_{\Pi} = 1$ м коэффициент $K_{\Pi\Pi}$ равен 1,75.

Следовательно, в данном случае ламельный фильтр имеет в 1,75 раз большую фильтровальную поверхность, чем патронный фильтр.

Коэффициенты увеличения скорости фильтрования K_V и повышения производительности K_Q определяются следующим образом:

$$K_V = v_{\phi} / v_{\phi H}; \quad (9)$$

$$K_Q = K_S K_V. \quad (10)$$

Как следует из анализа данных табл. 1 и всего вышеизложенного, при конструктивном исполнении фильтровальных элементов в виде ламелей, объединенных в секции, и при качественной периодической водовоздушной очистке рабочих поверхностей ламелей от отработанного фильтрующего слоя с осадком (давление 5...6 бар, интенсивность 16 (л/с)/м², длительность – 30 мин), обеспечивается возможность создания фильтров с производительностью до 5000 м³/ч, что достаточно для очистки до 100 000 м³ ВТЖ или воды в сутки одним фильтром. Таким образом, решение задачи высокопроизводительной тонкой и экономичной очистки больших объемов и расходов водных жидкостей достижимо.

Удельная часовая гидравлическая нагрузка, характеризующая производительность единичного оборудования, может достигать 720 (м³/ч)/м², что в 90 раз больше по сравнению с напорными объемными фильтрами. Однако это направление реализуется только в случае создания достаточно совершенных ламельных намывных фильтров с ламелями длиной порядка 2...3 м.

Представим опытный намывной фильтр НЛФ-1200-1, который послужил началом создания единичного фильтровального оборудования с производительностью в десятки раз большей производительности объемных напорных фильтров.

Опытный намывной фильтр НЛФ-1200-1

На основе приведенной информации, в ЗАО "Системы водоочистки" (г. Ульяновск) спроектирован, изготовлен и испытан опытный безнапорный намывной ламельный фильтр НЛФ-1200-1, предназначенный для эксплуатации в составе двухступенчатой контейнерной станции (КС).

На первой ступени КС исходная загрязненная вода (табл. 2) проходит предварительную очистку от механических примесей в тонкослойном отстойнике, а затем (на второй ступени) очищается в фильтре НЛФ-1200-1. Мутность воды, поступающей на фильтр, $C_{\text{ми}} \leq 2$ мг/дм³, после фильтрования – $C_{\text{мо}} \leq 0,5$ мг/дм³ (табл. 3). Фильтр в КС

работает в режиме скорого безнапорного фильтрования.

2. Показатели качества исходной воды

Показатель	Символ	Исходная вода
Щелочность	$\text{Щ}_{\text{и}}$, ммоль/дм ³	0,6...0,8
Мутность	$C_{\text{ми}}$, мг/дм ³	100
pH	pH _и	6,5...7,5

3. Технические характеристики намывного ламельного фильтра НЛФ-1200-1

Технические характеристики	Значение
Производительность фактическая $Q_{\text{ф}}$, м ³ /ч	25
Мутность очищенной воды $C_{\text{мо}}$, не более, мг/дм ³	0,5
Мутность исходной воды $C_{\text{ми}}$, не более, мг/дм ³	2
Средний размер частиц намывного слоя \bar{d} , мкм	40
Площадь фильтрования $S_{\text{ф}}$, м ²	120
Удельная часовая гидравлическая нагрузка, (м ³ /ч)/м ²	26
Количество фильтровальных секций, шт.	10
Количество фильтровальных ламелей в секции, шт.	44
Площадь горизонтальной проекции пакета ламелей, м ²	0,95
Шаг ламелей, мм	22
Габаритные размеры ламелей $L_{\text{л}} \times B_{\text{л}} \times H_{\text{л}}$, мм	2000×60×10
Перепад давления с обеих сторон ламели, бар	0,27
Расход промывочной воды, м ³ /ч	4
Расход воздуха, м ³ /ч	2
Габаритные размеры фильтра $L \times B \times H$, м	1,54 × 1,23 × 8,0
Масса фильтра без воды, кг	3500

Фильтр НЛФ-1200-1 (рис. 5) имеет тонкостенный призматический корпус 2, выполненный в виде колонны с пирамидальным днищем 3, предназначенным для сбора осадка механических примесей (взвесей). Внутри корпуса расположены фильтровальные ламели 7, объединенные в секции 6. В пространстве 10 между секциями ламелей размещены вертикальные промывочные штанги 9 с щелевыми соплами, обеспечивающие периодическую водовоздушную промывку поверхностей ламелей. Штанги 9 приводятся в возвратно-поступательное движение с помощью качающегося пантографа 8 и пневмопривода 1 с длиной хода 600 мм.

Для минимизации расходов воздуха и про-

мывочной воды в каждом зазоре между секциями ламелей расположены по две штанги с соплами на длине 1000 мм (на одной штанге снизу, а на другой сверху). Раздача воды и воздуха по штангам осуществляется с помощью панели распределителей 4, соединенных с промывочными штангами полиуретановыми шлангами. Продолжительность промывки ламелей – 30 мин, а время намывки фильтрующего слоя – 40 мин (при производительности 4 м³/ч).

При увеличении площади $S_{\text{г}}$ до 5 м² производительность НЛФ составит 125 (м³/ч)/м². Фильтр НЛФ-1200-1 в 2,8 раза производительнее скорых объемных фильтров.

Цикл работы фильтра НЛФ-1200-1 состоит из следующих этапов:

- намыв фильтрующего слоя порошка на поверхности ламелей;
- непрерывное фильтрование воды (или ВТЖ);
- водовоздушная очистка ламелей от отработавшего намывного фильтрующего слоя.

Намывная суспензия приготавливается в отдельной емкости с помощью электромешалки и дозатора; загрузка бункера контролируется датчиком объема. В емкость подаются микропорошок и вода из резервуара чистой воды (РЧВ). Приготовленная намывная суспензия подается во внутреннюю полость фильтра НЛФ и проходит через коллекторную и поддерживающую сетки ламелей, оставляя на фильтрующей сетке слой микропорошка.

Из полостей ламелей водная основа суспензии сбрасывается в РЧВ. Учет расхода воды осуществляется расходомером. Закрываются элементы запорной арматуры, открытые при режиме намывки, и начинается процесс фильтрования. Исходная загрязненная вода (или ВТЖ) из первой ступени очистки подается в корпус фильтра. Регулирование расхода воды осуществляется по показаниям расходомеров с помощью дискового поворотного затвора. Затем вода очищается через фильтрующий слой, намытый на поверхности ламелей. Фильтрат из полостей ламелей отводится в РЧВ.

С течением времени непрерывного фильтрования на поверхностях намывного слоя формируется слой осадка, толщина которого постепенно возрастает. Соответственно возрастает и сопротивление фильтрующего слоя и высота слоя воды над пакетом ламелей. По достижению заданного верхнего уровня слоя воды над пакетом ламелей отключается подвод загрязненной воды.

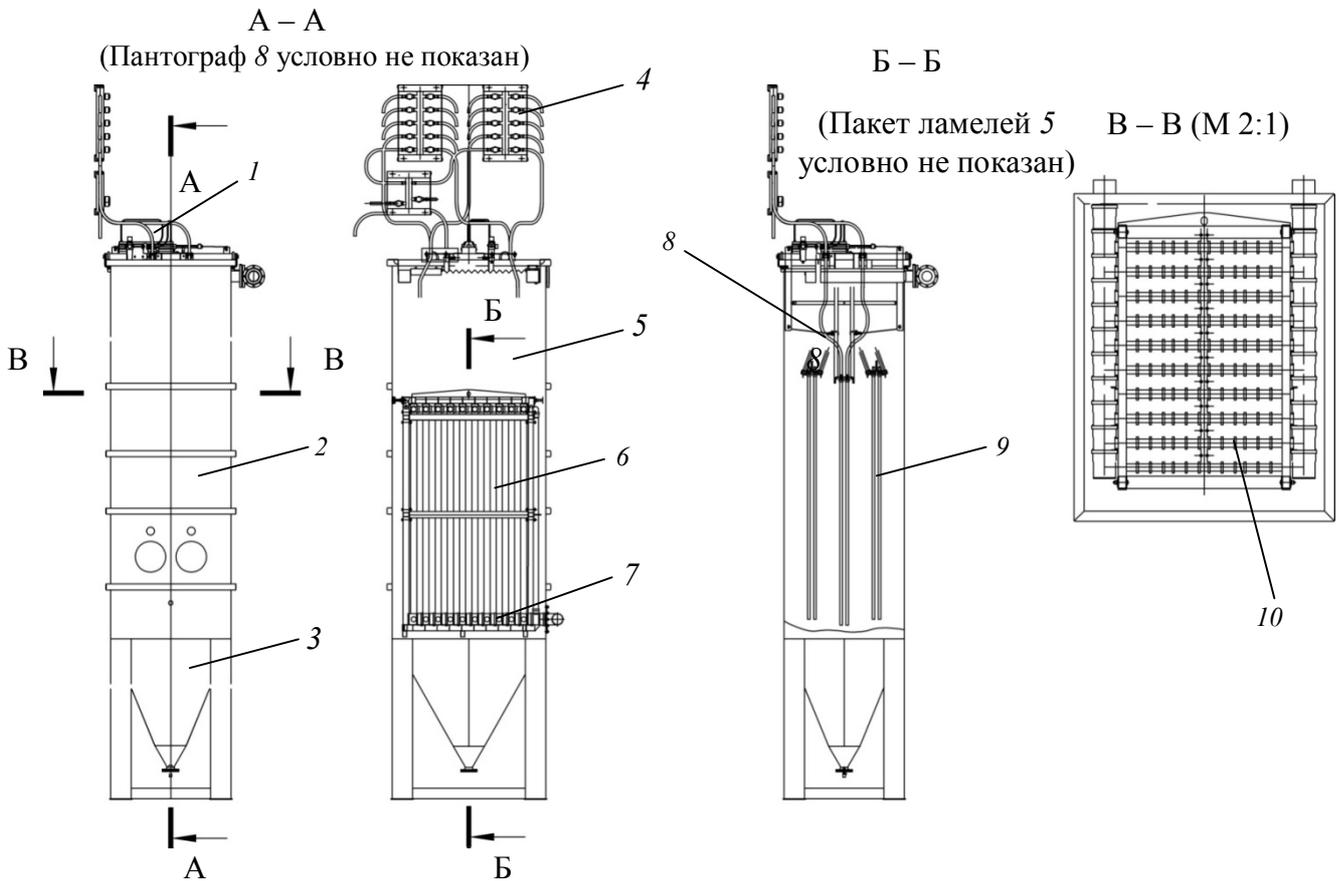


Рис 5. Конструктивная схема намывного ламельного фильтра НЛФ-1200-1:

1 – пневмопривод; 2 – корпус; 3 – днище; 4 – панель пневмоуправления; 5 – пакет секций ламелей; 6 – секция ламелей; 7 – ламель; 8 – качающийся пантограф; 9 – промывочная штанга; 10 – зазор между секциями ламелей

Очищенная вода сливается в расходную емкость до достижения нижнего уровня в корпусе фильтра. Далее следует этап смыва отработанного намывного фильтрующего слоя вместе с осадком с поверхности ламелей и удаления суспензии из фильтра на переработку. С помощью шламовых насосов вода с осадком подается в гидроциклон, из которого через шламовое сопло микropорошок сбрасывается в первую ступень очистки, а вода (ВТЖ) с осадком взвесей подается в устройство сгущения и/или в канализацию.

Промывочная вода подается напрямую из расходной емкости, подводится в вертикальные промывные штанги и выбрасывается из щелевидных сопел, расположенных с шагом 15 мм в шахматном порядке с обеих сторон штанги.

Спаренные штанги с помощью качающегося пантографа перемещаются по зазору между секциями ламелей. К штангам подводится смесь промывочной воды и сжатого воздуха, благодаря чему образуются импульсные водовоздушные струи, обеспечивающие высокий эффект очистки ламелей.

При образовании вакуума в полостях ламелей и наполнении их воздухом, выделяющимся из воды, срабатывает воздушный электроклапан. Гипохлорит натрия и сульфат аммония подаются в корпус по отдельным линиям.

Заключение

При опытно-промышленных испытаниях и длительной пробной эксплуатации намывного безнапорного фильтра НЛФ-1200-1 зафиксированы следующие результаты и предложено несколько рекомендаций:

1) удельная часовая гидравлическая нагрузка ламельного фильтра НЛФ-1200-1 равна $26 \text{ (м}^3/\text{ч)/м}^2$ при площади фильтра в горизонтальном сечении $0,95 \text{ м}^2$;

2) фильтрующий слой с осадком, сформировавшийся на ламелях, однороден по их ширине и пропорционально утолщается и загрязняется по длине;

3) водовоздушная очистка ламелей с помощью штанг с щелевыми соплами обеспечивает качественную и однородную регенерацию рабочих поверхностей ламелей;

4) длительность непрерывной качественной очистки воды или ВТЖ до регенерации ламелей находится в интервале двух-трех часов. За это время производительность фильтра уменьшается в два раза по сравнению с первоначальной;

5) производительность фильтра полностью восстанавливается после регенерации ламелей. Рекомендуемый расход воды при промывке ламелей составляет 50 м³/ч на один квадратный метр площади горизонтальной проекции рабочего объема фильтра;

б) рекомендуемая длительность промывки ламелей – 30 мин.

Таким образом, показано, что целесообразным направлением дальнейшего совершенствования фильтровального высокопроизводительного оборудования является реализация технологии очистки водных жидкостей от механических примесей в тонком фильтрующем слое, намытом на поверхности ламелей. Предложены принципиальные технические решения безнапорных намывных (тонкослойных) фильтров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свод правил СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализованная редакция. Строительные нормы и правила: (СНиП) 2.04.02 – 84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения: нормативно-технический материал. – М.: ООО "Аналитик", 2012. – 124 с.
2. Линевиц, С.Н. Современные и перспективные методы и технологии кондиционирования природных вод в водоснабжении / С.Н. Линевиц, С.В. Гетманцев. – Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. (Новочеркасский политехн. ин-т); ОАО "АУРАТ". – М.: ООО "ГК ИТЛ", 2013. – 324 с.
3. Пат. № 2469767, РФ. МПК В01D 27/00, В01D 37/02. Намывной патронный фильтр / А.В. Бусарев, С.В. Леонтьева, А.Б. Адельшин, А.С. Селюгин. – 2010.
4. Пат. № 2531392, РФ. МПК В01D 24/00. Намывной фильтр / Е.М. Булыжев, Г.А. Джавахия. – 2014. – Бюл. № 29.

5. Иванов М. Намывные фильтры – http://www.aqua-therm.ru/articles/articles_55.html

6. Пат. № 2561098, РФ. МПК В01D 29/01, В01D 37/02. Намывной ламельный фильтр / Ф.В. Кармазинов, Е.А. Мельник, Е.Д. Нефедова, Е.М. Булыжев [и др.]. – 2015. – Бюл. № 23.

7. Пат. № 2572543, РФ. МПК В01D 29/01, В01D 37/02. Способ очистки жидкости и намывной ламельный фильтр для его реализации / Е.М. Булыжев, Э.Е. Булыжев, Е.Д. Кондратьев [и др.]. – 2016. – Бюл. № 2.

8. Листовые фильтры – http://www.oil-filters.ru/plate_filters.php.

REFERENCES

1. Code of Rules SR 31.13330.2012. Water supply. External Communications and Constructions. Actualized Edition. Construction Norms and Rules: (CNaR) 2.04.02 – 84. Water supply. External Communications and Constructions: Normative and Technical Material. – M.: "Analyst" Co., 2012. – pp.124.
2. Linevich, S.N. *Modern and Promising Methods and Techniques of Natural Water Conditioning in Water Supply* / S.N. Linevich, S.V. Getmantsev. – South Russian State Technical University. (Novocherkassk Polytechnic Institute); "AURAT" Co.– M.: "GK ITL", 2013. – pp. 324.
3. Pat. № 2469767, RF. IPC B01D 27/00, B01D 37/02. Precoat cartridge filter / A.V. Busarev, S.V. Leontieva, A.B. Adelshin, A.S. Selyugin. – 2010.
4. Pat. № 2531392, RF. IPC B01D 24/00. Precoat filter / E.M. Bulyzhev, G.A. Javakhiya. – 2014. – Bull. № 29.
5. Ivanov M. Precoat filters – http://www.aqua-therm.ru/articles/articles_55.html
6. Pat. № 2561098, RF. IPC B01D 29/01, B01D 37/02. Precoat lamellar filter / F.V. Karmazinov, E.A. Melnik, E.D. Nefyodova, E.M. Bulyzhev [et al.]. – 2015. – Bull. № 23.
7. Pat. № 2572543, RF. IPC B01D 29/01, B01D 37/02. Method for liquid cleaning and precoat lamellar filter for its realization / E.M. Bulyzhev, E.E. Bulyzhev, E.D. Kondratiev [et al.]. – 2016. – Bull. № 2.
8. Leaf-type filters – http://www.oil-filters.ru/plate_filters.php.

Рецензент д.т.н. Ю.В. Полянсков

Повышение точности чистовой обработки зубчатых колес

Проведен анализ влияния геометрии червячных фрез на точность обработки зубчатого венца. На основании этого анализа выполнена корректировка профиля шевера, что позволило повысить точность обработки.

Ключевые слова: червячная фреза; шевер; зубчатое колесо; точность обработки; корректировка профиля.

V.V. Klepikov, D.Eng.,
A.A. Cherepakhin, Can.Eng.
(Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI))

Accuracy increase in cog-wheel finishing

One of the most problem areas in the technological process of cog-wheel machining is a succession of roughing (by a hob) and finishing (by shaving). In the paper there are shown the results of comparative experimental researches of a succession heredity "milling by a hob – shaving) at working with an uncorrelated and correlated shaver. The shaver correction was carried out according to the results of the analysis of toothing and accuracy parameters (profile error) of a milling wheel.

Keywords: hob; shaver; cog-wheel; machining accuracy; profile correction.

Одно из самых проблемных мест в технологическом процессе обработки зубчатого колеса – это цепочка «черновая обработка (червячной фрезой) – чистовая обработка (шевингованием)». Червячные фрезы часто не обеспечивают заданную подрезку ножки зуба или формирование фаски на головке зубьев нарезаемых колес, а шевера не всегда обеспечивали требуемый профиль зуба, форму и расположение пятна контакта, т.к. расчетные параметры не способны учесть всех тонкостей конкретного технологического процесса обработки зубчатых колес [1, 2].

В технологических лабораториях МГИУ и МГТУ (МАМИ) (в настоящее время – объединенный Технологический университет) были проведены исследования по повышению точности зубообработки за счет корректировки профиля шевера, которая осуществлялась по результатам анализа геометрии червячных фрез и фактической точности зубчатого венца после фрезерования [4, 5].

В качестве объекта исследования были выбраны цилиндрические зубчатые колеса из стали 25ХГМ с модулем $m = 4,0$ и $4,25$; число зубьев – 35, 34, 39, 22, 26, 23, 36, 44, 30, 31; угол наклона зубьев $22^\circ 10' 51''$ и 0° ; направление линии зуба – правое и левое; угол профиля 20° ; 7-я степень точности; ХТО – нитро-

цементация.

Червячные фрезы – цельные из стали Р6М5К5 (63...66 HRC) с модулем 4,0 и 4,25; угол зацепления 20° ; одно и двухзаходные. Однозаходные фрезы имели осевой шаг захода 12,557; 12,576; 13,353; 13,364, двухзаходные 24,516; 24,518; 24,522; 26,063. Режимы резания: скорость резания $v = 48,4$ м/мин; частота вращения $n = 140$ мин⁻¹; подача $S = 0,9$ мм/об.

Два типа шеверов изготавливались из стали Р6Ф5 и Р8 (63...66 HRC) и подвергались цианированию, с модулем 4,0 и 4,25 мм, углом зацепления 20° , углом наклона зубьев 15° , шириной 25 мм, числом зубьев 51, 92, 88, 43, 54, 109, 48, 53, 55, 17, 100. Тип 1 – не скорректированный профиль («чистоэвольвентный» шевер); тип 2 – шевер с скорректированным профилем.

Шевингование выполнялось методом параллельного шевингования дисковыми шеверами. Припуск под шевингование контролировался по длине общей нормали [3].

После зубофрезерования и зубошевингования контролировались: колебание ИМР (измерительное межцентровое расстояние) за один оборот и на одном зубе, отклонение профиля, направление зуба, а так же форма и расположение пятна контакта пары зубчатых колес.

Контроль колебаний ИМР проводился на межценнре фирмы «Мааг», отклонение профиля на эвольвентомере фирмы «Мичиган ТУЛ», форма и расположение пятна контакта на контрольно-обкатном станке фирмы «Демм» [2]. Пример результатов измерения

погрешности профиля зуба фрезерованных и шевингованных зубчатых колес с «чисто-эвольвентным» профилем представлены на рис. 1 и рис. 2.

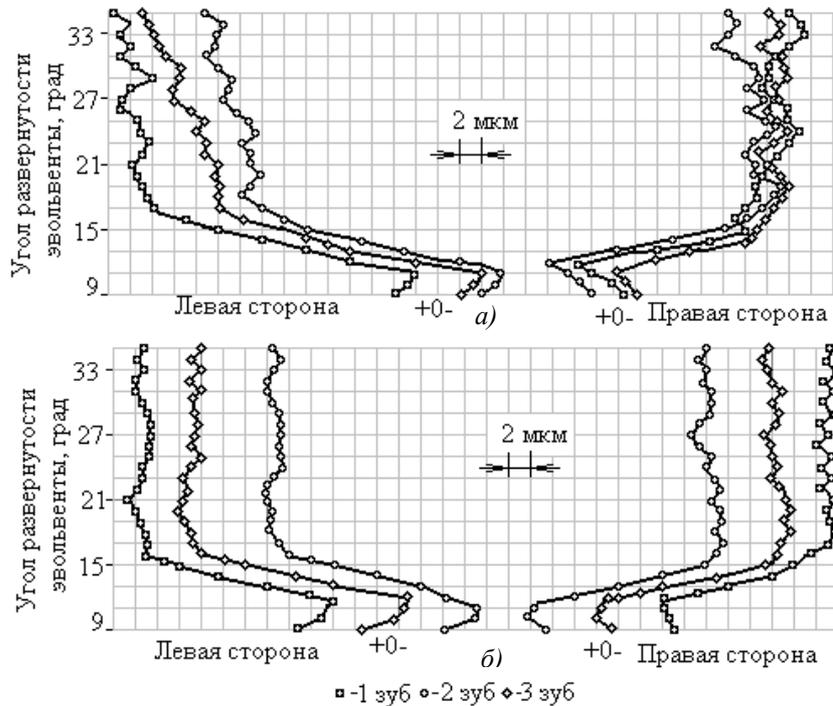


Рис. 1. Погрешность профиля зубьев колеса (мкм) после зубофрезерования (а) и шевингования шевером первого типа (б)



Рис. 2. Радиальное биение зубчатого венца и разность соседних основных шагов после фрезерования зубчатого колеса (а и в соответственно) и после шевингования шевером первого типа (б и г соответственно)

Припуск под шевингование составлял 0,15 мм [2].

На базе полученных результатов и анализа зацепления по пятну контакта, было проведено корректирование рабочего профиля шеве-

ров.

На рис. 3 приведены диаграммы шеверов с эвольвентным 1 и корректированным 2 профилями, обеспечивающими заданное качество зубьев колес.

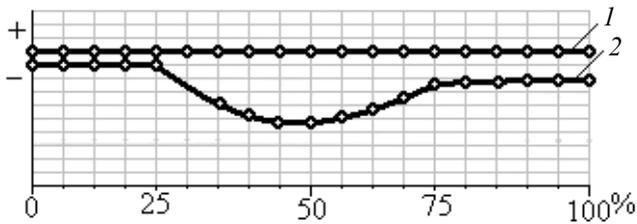


Рис. 3. Диаграммы шевров с эвольвентным 1 и скорректированным 2 профилем

Результаты измерений фрезерованного зубчатого колеса червячными фрезами с скорректированным профилем приведены на рис. 4 и рис. 5.

Управление технологическим процессом обработки зубчатых колес представляет собой сложный информационно-энергетический процесс, основанный на системном анализе конструкторских и технологических пара-

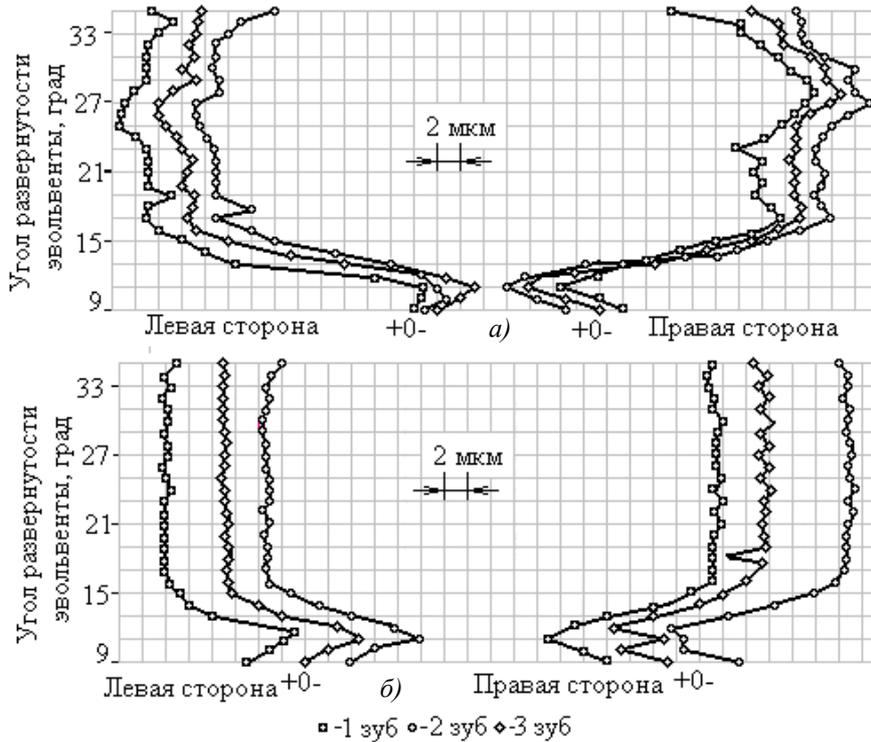


Рис. 4. Погрешность профиля зубьев колеса (мкм) после зубофрезерования (а) и шевингования шевром второго типа (б)

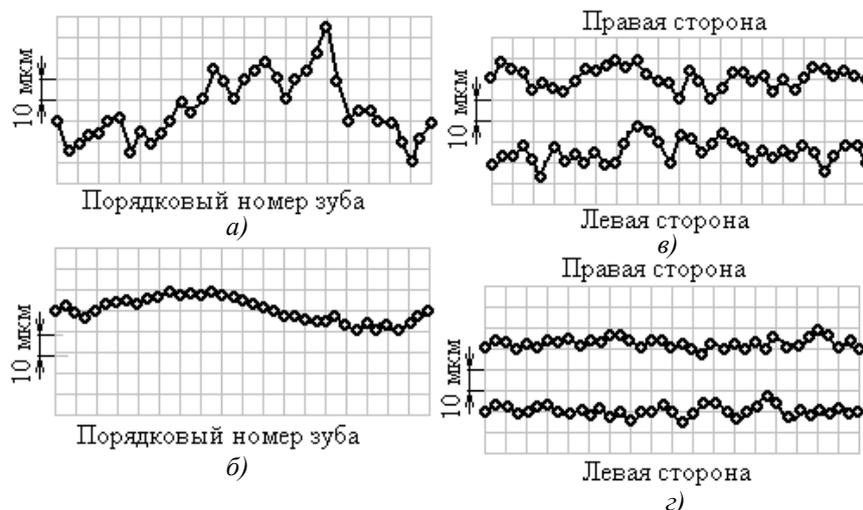


Рис. 5. Радиальное биение зубчатого венца и разность соседних основных шагов после фрезерования зубчатого колеса (а и в соответственно) и после шевингования шевром второго типа (б и г соответственно)

метров. Технологический процесс таких взаимодействующих методов обработки как зубофрезерование и зубошевингование может

быть представлен в виде некоторой последовательности изменения конструктивных и технологических параметров, формируемых

на предшествующих операциях [4, 5, 6].

Совокупность этих параметров образует так называемое параметрическое пространство зубчатого колеса, требующее новых и совершенствования существующих технических решений. В частности повышение производительности зубофрезерования в значительной степени связано с обработкой заготовок паке- том. При этом особую сложность представляет установка заготовок с предварительно сформированным зубом из-за значительной погрешности ориентации заготовок относительно режущей кромки фрезы, возникающей в результате неравномерного распределения припуска по профилю зубьев.

Для ориентации пакета таких заготовок было разработано приспособление, состоящее из сектора, зубья которого выполнены с положительным смещением контура, и фиксаторов, размещенных на кронштейне, закрепленном на оси сектора. Кроме того, на оправку зажимного приспособления устанавливалось колесо, осуществляющее кинематическую связь заготовок с режущими кромками фрезы. Число его зубьев равнялось числу зубьев ко- леса. После установки пакета заготовок фиксаторы подводятся к зубьям колеса и ориентируют их относительно фрезы. После закрепления заготовки отводятся в исходное положение. Такое решение позволяет оценить взаимное положение фрезы и заготовки и в случае необходимости произвести поднастройку инструмента.

Кроме процесса фрезерования исследова- лись новые технические решения шевингова- ния зубьев колес. В частности с целью повы- шения стойкости инструмента и производи- тельности обработки зубчатых колес создава- лись одинаковые условия резания на обеих сторонах зубьев шевера. Для этого заготовку устанавливали со смещением относительно шевера, уменьшая при этом угол станочного зацепления и увеличивая коэффициент пере- крытия. При такой наладке осуществляется равномерный съем металла с обеих сторон зубьев колеса, но снижается качество обрабо- танных поверхностей [3].

Для устранения этого недостатка вводится дополнительная поперечная подача шевера, которая постепенно уменьшается до тех пор, пока не совпадут оси шевера и обрабатываемого колеса. Затем шевер выпол- няет калибрующие ходы. Чтобы износ обеих сторон зубьев шевера был равномерным, при обработке новой партии заготовок шеверу не- обходимо обеспечить вращение в противо-

положном направлении.

Проведенные комплексные исследования процессов фрезерования и шевингования зуб- чатых колес позволили повысить качество их обработки и снизить уровень шума коробки переключения передач автомобиля на 7 дВ.

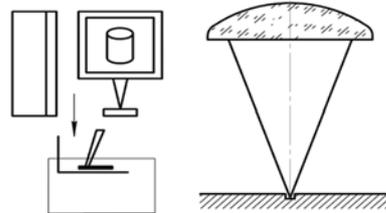
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Современные** методы обработки зубчатых колес / А.С. Калашников, Ю.А. Моргунов, П.А. Калашников. М.: Изд. центр «Спектр», – 2012. – 239 с.
2. **Клепиков В.В., Таратынов О.В., Курочкин Н.А., Солоницын Б.М.** Анализ процесса формирования качества эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2005. – № 3. – С. 49–53.
3. **Черепяхин А.А., Клепиков В.В., Солдатов В.В.** Методы обработки ответственных деталей автомобилей. М.: МГИУ, 2011. – 214 с.
4. **Параметрическая** оптимизация обработки зубчатых колес. Монография: Черепяхин А.А., Виноградов В.М., Клепиков В.В./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. – 230
5. **Таратынов О.В., Клепиков В.В., Черепяхин А.А.** Пути совершенствования технологических систем // Тех- нология машиностроения. – 2014. – № 9. – С. 61–63.
6. **Клепиков В.В., Черепяхин А.А.** Пути совершенст- вования технологических процессов чистовой обработки изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 12(42). – С. 15– 18.

REFERENCES

1. *Modern Methods of Cog-wheel Machining* / A.S. Ka- lashnikov, Yu.A. Morgunov, P.A. Kalashnikov. M.: Publishing Center "Spectrum", – 2012. – pp. 239.
2. Klepikov V.V., Taratynov O.V., Kurochkin N.A., Solo- nitsyn B.M. Analysis of quality formation in involute surfaces of spur gears // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2005. – № 3. – pp. 49–53.
3. Cherepakhin A.A., Klepikov V.V., Soldatov V.V. *Me- thods of Critical Parts Working for Motor Cars*. M.: MSIU, 2011. – pp. 214.
4. *Parametric Optimization of Cog-Wheel Machining*. Mo- nograph: Cherepakhin A.A., Vinogradov V.M., Klepikov V.V./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. – 230
5. Taratynov O.V., Klepikov V.V., Cherepakhin A.A. Ways for technological system up-dating // *Engineering Techniques*. – 2014. – № 9. – pp. 61–63.
6. Klepikov V.V., Cherepakhina A.A. Ways for technolo- gical process up-dating in parts finishing // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 12(42). – pp. 15– 18.

Рецензент д.т.н. Г.А. Харламов



УДК 621.9.06.529
DOI: 10.12737/20597

Ю.А. Моргунов, к.т.н.,
Б.П. Саушкин, д.т.н.
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) г.Москва)
E-mail: morgunov56@mail.ru

Технико-экономические аспекты аддитивного формообразования

Приведена сравнительная характеристика классических и аддитивных технологий одного целевого назначения, выделены их позитивные и негативные стороны. Рассмотрена задача технико-экономического обоснования внедрения технологий аддитивного формообразования на машиностроительном предприятии. Отмечается востребованность таких технологий в производстве авиационно-космической техники.

Ключевые слова: аддитивное формообразование; технико-экономическое обоснование.

Yu.A. Morgunov, Can.Eng.,
B.P. Saushkin, D.Eng.
(Moscow University of Mechanical Engineering (MAMI) Moscow)

Technical and economic aspects of additive shaping

The techniques of additive shaping develop intensively during the last 20-30 years. Their application in mechanical engineering allow reducing considerably the duration of technological preparation for new produce manufacturing, using fundamentally new design-technological solutions, reducing finally labour-intensiveness and cost price of significant domestic defense produce manufacturing.

In the paper there is shown a comparative characteristic of common and additive technologies of one purposeful destination, their advantages and disadvantages are emphasized. The problem of technical and economic assessment for the introduction of the techniques of additive shaping at an enterprise of mechanical engineering is considered. The relevance of such techniques in aerospace engineering production is emphasized, particularly under conditions of experimental production when the reduction of the cycle duration in engineering and design preparation of manufacturing is a decisive factor.

The urgency of the development of integrated techniques which will ensure the further increase of technical and economic characteristics of production at the expense of the realization of advantages of both subtractive methods and additive ones affecting the material and connected with this of synergetic effects is substantiated.

Keywords: additive shaping; technical and economic substantiation.

Ключевым вопросом социально-экономического развития России является технологическая модернизация промышленного производства в области машино- и приборостроения – основы оборонно-промышленного комплекса страны [1]. Такая модернизация производства подразумевает опережающее развитие и внедрение аддитивных технологий, в использовании которых наша страна отстает по некоторым оценкам на 10 – 15 лет [2 – 4].

Согласно классификатору методов размерного формообразования [5] классификацион-

ный признак, характеризующий трансформацию исходного объема заготовки в объем детали, позволяет разделить все существующие методы и технологии на их основе на четыре класса (табл. 1).

Широкое распространение получили методы формообразования второго и третьего классов, на которых основаны, так называемые, субтрактивные и аддитивные технологии. Технологии второго класса превалируют и будут превалировать в обозримом будущем в машиностроительном производстве. Технологии третьего класса редко применялись для

целей размерного формообразования. Однако в 80–90-х гг. XX века в связи с развитием и удешевлением цифровых технологий, появлением прецизионных мехатронных приводов, совершенствованием лазерной техники и дру-

гими факторами аддитивные методы и технологии размерного формообразования совершили качественный скачок и стали конкурентоспособными с классическими технологиями обработки со снятием стружки (табл. 2).

1. Классы методов обработки по характеру трансформации исходного объема заготовки

Класс	Описание класса	Название	Примеры технологий
1	В процессе обработки объем заготовки не изменяется по величине, но перераспределяется в пространстве.	Методы перераспределения объема. <i>Redistributive methods.</i>	Ковка, штамповка, гибка.
2	Объем изделия получают путем удаления «лишнего» объема заготовки.	Методы удаления части объема заготовки. <i>Subtractive methods.</i>	Обработка резанием лезвийным или абразивным инструментом, химическое растворение.
3	Объем изделия получают добавлением материала к исходной заготовке или нанесением материала на технологическую подложку.	Методы наращивания объема изделия. <i>Additive methods.</i>	Гальваника, газотермическое напыление, селективное лазерное спекание или плавление, лазерная стереолитография, лазерное осаждение металла из порошка.
4	Изделие получают одновременным или последовательным удалением материала с одной части заготовки и нанесением его на другую.	Комбинированные (интегрированные) методы формирования объема изделия. <i>Combined (integrated) methods.</i>	Некоторые способы электрохимической обработки, модификации метода химических транспортных реакций, интеграция металлорежущих станков с ЧПУ с лазерной головкой и пр.

2. Сравнительная характеристика технологий второго и третьего классов

Свойства (характеристики) технологии	Класс по табл. 1			
	2		3	
1. Возможность достижения высокой точности (10^{-7} м) методом последовательных приближений.	Выше	+	Ниже	–
2. Возможность формирования специальных свойств поверхностного слоя.	Выше	+	Ниже	–
3. Производительность и низкая себестоимость в условиях крупносерийного и массового производства.	Выше	+	Ниже	–
4. Развитый парк технологического оборудования.	Есть	+	Нет	–
5. Высокий уровень унификации и стандартизации изделий и средств технологического оснащения.	Есть	+	Нет	–
6. Возможность применения развитого и апробированного теоретического аппарата технологии машиностроения.	Выше	+	Ниже	–
7. Уровень развития программного обеспечения (CAD/CAM/ CAE).	Выше	+	Ниже	–
8. Номенклатура методов, способов и технологических операций	Шире	+	Уже	–
9. Наличие развитой нормативно-справочной базы.	Есть	+	Нет	–
10. Количество единиц технологического оборудования в ТП.	Больше	–	Меньше	+
11. Дополнительные траты на складские и транспортные работы.	Выше	–	Ниже	+
12. Затраты на оснастку и инструменты.	Больше	–	Меньше	+
13. Занимаемые производственные площади.	Больше	–	Меньше	+
14. Затраты на сборку-разборку отдельных сборочных единиц.	Выше	–	Ниже	+
15. Длительность цикла и стоимость технологической подготовки производства новых изделий.	Выше	–	Ниже	+
16. Вероятность появления брака*.	Выше	–	Ниже	+
17. Затраты трудовых ресурсов.	Выше	–	Ниже	+
18. Коэффициент использования материалов.	Ниже	–	Выше	+
19. Возможность получения изделий с градиентным составом и свойствами.	Нет	–	Есть	+
20. Степень сложности изготавливаемых изделий.	Ниже	–	Выше	+

*Вероятность отказа многостадийного процесса, как правило, выше, чем малостадийного.

Эти технологии позволяют существенно сократить длительность технологической подготовки производства новых изделий, использовать принципиально новые конструкторско-технологические решения, снизить, в конечном счете, трудоемкость и себестоимость изготовления ответственной продукции [6]. Аддитивные технологии особенно востребованы в производстве авиационно-космической техники в условиях единичного или мелкосерийного типов производства [3, 7]. Так, доля аэрокосмической отрасли на мировом рынке аддитивных технологий составляет около 12 %. Обоснована высокая эффективность применения аддитивных технологий на предприятиях ракетно-космической отрасли, в частности, для изготовления ответственных деталей двигателей различного типа.

При освоении технологий третьего класса актуальной задачей становится описание их характеристик и условий реализации методами и средствами классической технологии машиностроения. Уточняется понятийный аппарат, устанавливаются взаимосвязи между параметрами физико-химических процессов, обеспечивающих синтез твердого тела заданной конфигурации, и технологическими характеристиками операций аддитивного формообразования [8]. Такая работа приведет в обозримом будущем к созданию нормативно-справочной базы аддитивных технологий.

При обосновании внедрения новых базовых технологий учитывают их влияние на основные функциональные показатели изделия и затраты на всех стадиях жизненного цикла. Так, в [3] применительно к технологиям изготовления воздушных судов в качестве критерия эффективности технологий принят коэффициент $K_{\text{эф}}$, определяемый из соотношения

$$K_{\text{эф}} = \Delta\mu/\Delta W \quad (1)$$

и правило предпочтения – $K_{\text{эф}} \rightarrow \max$ – при $R \geq [R_0]$ и $W \leq [W_0]$, где $\Delta\mu = f(q, v, R)$ – функция полезности; q – полезная нагрузка; v – крейсерская скорость; R – ресурс изделия; ΔW – стоимость жизненного цикла, $[R_0]$, $[W_0]$ – ограничения на ресурс и стоимость жизненного цикла.

Выражение (1) дает общую оценку эффективности технологии, однако, в заводских условиях ее использование затруднительно из-за неопределенности в ряде случаев функции полезности, затрат на стадии эксплуатации и прочих факторов.

С формально-технологической точки зре-

ния внедрение аддитивной технологии на конкретном предприятии оправдано и целесообразно в том случае, если при прочих равных условиях снижаются издержки производства на единицу продукции (удельные ресурсозатраты). Таким образом, для технико-экономического обоснования внедрения аддитивной технологии на предприятии первостепенное значение приобретает расчет разности цеховых себестоимостей изготовления детали или сборочной единицы по двум вариантам технологий:

– существующая технология изготовления изделия с использованием освоенных методов получения заготовок и механообработки (ТП₁);

– технология изготовления изделия с использованием операций аддитивного формообразования (ТП₂).

Прежде, чем обсудить особенности такого расчета, сформулируем некоторые условия, ограничения и допущения:

1. Согласно [9] необходимым условием сравнения технико-экономической эффективности вариантов технологий является тождественность производственных результатов, которое сводит все различия между сопоставляемыми вариантами к различию производственных затрат. Поэтому прежде, чем проводить сравнительный анализ вариантов необходимо проверить тождество результатов по составу продукции, ее качеству, объему продукции, срокам выполнения производственного задания, режиму времени и условиям труда.

2. Очевидно, что если второй вариант позволяет сразу получить составную часть изделия, состоящую из n деталей, то для обеспечения тождественности результата по составу продукции в первом варианте следует учитывать суммарные удельные затраты на изготовление каждой из n деталей плюс себестоимость процесса их сборки.

3. Очевидно также, что если второй вариант обеспечивает сокращение цикла технологической подготовки производства, то для сравнения необходимо обеспечить тождественность вариантов по срокам. Такая ситуация характерна при внедрении аддитивных технологий в производстве новых изделий, однако рекомендации по расчету экономической эффективности от снижения сроков носят достаточно общий характер. Так, в [9] предлагается по первому варианту предусмотреть и рассчитать дополнительные затраты для выдерживания срока, обеспечиваемого по второму варианту,

что вызывает определенные трудности.

В конечном счете, сокращение цикла технологической подготовки производства обеспечивает ускоренную поставку товарной продукции на рынок, что особенно важно при изготовлении новой по потребительским свойствам товарной продукции в условиях жесткой конкуренции. Нам представляется, что это обстоятельство можно учитывать при расчете, как упущенную выгоду от потенциальной реализации продукции по варианту ТП₁. Такой расчет также вызывает вопросы из-за возможного изменения рыночной конъюнктуры, изменения уровня цен на продукцию данного наименования, типоразмера и исполнения, ценовой конъюнктуры. Однако он дает возможность достаточно просто оценить важное конкурентное преимущество аддитивных технологий.

Встречаются ситуации, когда сокращение срока производства и освоения новой техники диктуется не экономическими, а иными причинами (политическими, социально-экономическими, конъюнктурными), однако, детальный анализ позволяет и в этом случае выявить экономическую составляющую принятого решения.

4. Принимаем, что оба варианта обеспечивают одинаковое качество продукции, обусловленное техническими условиями на изготовление (тождественность по качеству продукции). Если же один из сравниваемых вариантов технологии позволяет существенно улучшить функциональные свойства изделия (например, ресурс), то этот фактор необходимо оценивать при расчете, руководствуясь имеющимися рекомендациями. Так, в [10] рекомендуется пересчитывать число изделий повышенного качества в большее число изделий обычного качества с пересчетом соответствующих затрат.

Учитывая сказанное, структура затрат на себестоимость изготовления и сборки по первому варианту технологии представляется в виде

$$C_1 = \sum_{i=1}^m (C_{1zi} + C_{1mi}) + C_{сб}, \quad (2)$$

а по второму –

$$C_2 = C_{пр} + C_{ад} + C_{пс}, \quad (3)$$

где C_1 , C_2 – суммарные себестоимости изготовления конечного продукта по сравниваемым вариантам технологии; C_{1zi} – себестоимость получения заготовки i -й детали сборочной единицы; C_{1mi} – себестоимость механообработки i -й детали; m – число изготавливаемых

деталей сборочной единицы; $C_{сб}$ – себестоимость сборки составной части изделия с учетом стоимости всех остальных комплектующих согласно спецификации сборочной единицы; $C_{пр}$ – себестоимость предварительных (предшествующих) операций; $C_{ад}$ – себестоимость операции (операций) аддитивного формообразования; $C_{пс}$ – себестоимость последующих операций окончательной обработки изделия.

Заметим, что аддитивные технологии послойного выращивания изделий из порошка не позволяют избавиться от остаточной пористости, что заставляет в ряде случаев использовать последующие технологии, например, изостатическое прессование, инфльтрацию, термообработку. Согласно имеющимся данным, как конечное изделие используют всего около 19 % продукции аддитивного производства.

Предполагается, что исходные материалы по второму варианту, например, металлический порошок являются покупными и на предприятии не производятся.

Для технико-экономической оценки эффективности двух вариантов технологий используют метод прямого расчета себестоимости [10], согласно которому выбор лучшего варианта осуществляют по двум критериям: расчетному коэффициенту сравнительной экономической эффективности E_p или по расчетному сроку окупаемости T_p . Правило предпочтения выражается неравенствами вида

$$E_p > E_n, T_p < T_n, \quad (4)$$

где индекс «н» соответствует нормативной величине соответствующего критерия. При нахождении этих критериев приходится рассчитывать разность суммарных цеховых себестоимостей при переходе от первого варианта ко второму ($\Delta C = C_1 - C_2$):

$$\Delta C = \Delta C_m + \Delta C_{зр} + \Delta C_a + \Delta C_{и} + \Delta C_{пр} + \Delta C_{зс} + \Delta C_{вм} + \Delta C_3 + \Delta C_{уп} + \Delta C_{сб}, \quad (5)$$

где ΔC_m – разность затрат на основные материалы по сравниваемым вариантам; $\Delta C_{зр}$ – разность затрат на зарплату производственных работников с начислениями; ΔC_a – разность затрат на амортизацию и ремонт оборудования; $\Delta C_{и}$ – разность затрат на инструмент с учетом переточек; $\Delta C_{пр}$ – разность затрат на станочные и контрольно мерительные приспособления; $\Delta C_{зс}$ – разность затрат на эксплуатацию и амортизацию зданий и сооружений; $\Delta C_{вм}$ – разность затрат на вспомогательные материалы; ΔC_3 – разность затрат на тех-

нологическую энергию; $\Delta C_{уп}$ – разность затрат на управление производственными процессами; $\Delta C_{сб}$ – затраты на сборку составной части изделия, выполняемой по аддитивному варианту, как одна деталь.

Проанализируем отдельные наиболее значимые слагаемые, входящие в правую часть выражения (5).

В общем случае разность расходов на материал ΔC_M рассчитывают по известной формуле [10], зная оптовые цены на единицу массы материала и отходов, нормы расхода материала и массу отходов на одно изделие по вариантам.

В табл. 3 приводятся данные о ценах на некоторые порошковые материалы на внешнем рынке и цены на них, извлеченные из коммерческих предложений некоторых компаний [4]. Как видно, из-за отсутствия собственного развитого производства и рынка порошковых материалов российскому потребителю приходится платить значительно больше по ряду позиций номенклатуры порошков. В нижней строке приведены средневзвешенные цены на прокат диаметром 30...100 мм из тех же материалов, полученные по результатам анализа коммерческих предложений, размещенных в сети. Представленные данные показывают, что стоимость порошковых материалов (для SLM) на порядок и выше цен на прокат, используемый в заготовительном производстве.

3. Стоимость некоторых порошковых материалов и соответствующего проката (Ев/кг)

Происхождение цены	Материал				
	Ti-6AL-4V	Co-Cr	AlSi12	Spesial steel	Inconel 625
Оптовая цена на внешнем рынке	200...300	150	70...90	70...80	75
SLM Solutions	520	210	60	130	160
EOS	485	320	122	235	–
Прутковый прокат в России (руб.)	17...25 (1300...1900)	–	3...5(Al) (230...350)	3...4 (200...270)	–

При послойном спекании (сплавлении) лазерным лучом или электронным пучком часть порошка, контактирующего с контуром формирующегося твердого тела, частично спекается или оплавляется и удаляется при последующем просеивании. Для относительно габаритных деталей сложной формы используются поддержки и подложка.

Все это приводит к появлению отходов и выражается в том, что коэффициент использования материалов лежит обычно в пределах 0,7 – 0,9. Для ответственных деталей авиакосмической техники сложной формы, полученных по технологии ТП₁ значение этого коэффициента 0,05 – 0,2.

Приведенные данные позволяют оценить отношение стоимости материала при аддитивном формообразовании (C_{M2}) к стоимости его при механической обработке (C_{M1}) величиной $C_{M2}/C_{M1} = 0,5-5$. Видно, что, несмотря на высокую стоимость порошка, ΔC_M может быть величиной, как положительной, так и отрицательной. Отметим тенденцию к снижению стоимости порошка с прогнозом на его удешевление на 75 % (электронный ресурс: ur-pro.ru).

Зарплату основных производственных рабочих для каждого варианта получаем суммированием по числу операций ТП [10]. Особенность сравнительных расчетов в нашем случае заключается в следующем.

Во-первых, как правило, использование операции аддитивного формообразования позволяет заметно снизить количество операций в технологическом процессе изготовления детали. Во-вторых, штучно-калькуляционное время на операции аддитивного формообразования составляет, как правило, десятки часов. Поскольку современное оборудование длительное время работает в автоматическом режиме, при его эксплуатации целесообразно применять многостаночное обслуживание и совмещение профессий. В результате станкоемкость и трудоемкость операции значительно отличаются. В отсутствие каких-либо нормативов затраты живого труда, необходимые для расчета зарплаты на операции аддитивного формообразования, следует определять экспериментально на стадии освоения нового оборудования.

Для этого составляют перечень ручных и машинно-ручных приемов, необходимых для перевода оборудования в автоматический цикл и завершения работы, оценивается их длительность и производится суммирование с учетом возможного перекрытия. Такие данные можно также затребовать у поставщика оборудования на стадии подготовки контракта или воспользоваться данными, полученными в результате эксплуатации оборудования, близкого по техническим характеристикам, на родственных предприятиях. Анализ показывает, что трудоемкость операции аддитивного формообразования относительно невелика.

Так, при изготовлении детали типа «втулка» при машинном времени работы 20...40 ч затраты живого труда составляют примерно 1 ч.

При выполнении расчетов возникает необходимость оценки штучно-калькуляционного времени операции аддитивного формообразования. Использование классической структуры нормы времени в данном случае затрудняется, поскольку нормативы для определения ее составляющих в настоящее время отсутствуют. В заводских условиях приходится использовать статистические методы их определения, используя методики хронометража и фотографии рабочего дня.

Определение машинного времени также представляет определенные трудности из-за отсутствия расчетных формул в справочниках и зависимости вида таких формул от метода и способа аддитивного формообразования. Поэтому для каждого способа аддитивного формообразования получают расчетное выражение для машинного или оперативного времени, исходя из существующей методики нормирования технологических операций с учетом специфики физико-химических процессов получения объемных твердых форм в каждом случае. Так, для послойного построения объемных форм, характерного, например, для селективного лазерного спекания, рекомендуется использовать следующее выражение для определения времени построения изделия t_0 :

$$t_0 = t_m + t_{b1} + t_{b2} = \sum \left(\frac{F_i}{k_{\pi} d_{\pi}^{эф} v_{л}} + t_i^{nc} \right) + t_{b2}, \quad (6)$$

где t_0 – оперативное время; t_m – машинное время, обусловленное перемещением пятна светового контакта по контуру слоя; t_{b1} – часть вспомогательного времени, необходимого для подготовки формообразования выделенных слоев; t_{b2} – прочие затраты вспомогательного времени (выгрузка, включая возможную технологическую выдержку, включение цикла); m – число выделенных слоев; $d_{\pi}^{эф}$ – эффективный диаметр пятна контакта лазерного излучения с порошковым слоем; k_{π} – коэффициент перекрытия; F_i – площадь i -го слоя, длина трассы обхода центром пятна контакта; $v_{л}$ – средняя скорость перемещения пятна контакта вдоль трассы; t_i^{nc} – время подготовки к обходу j -го слоя.

Для более точного расчета машинного времени следует принять во внимание стратегию обхода данного контура площадью F_i свето-

вым пятном и рассчитать длину трассы обхода δ_i каждого слоя. В этом случае

$$t_m = \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{v_{л}}. \quad (7)$$

Из приведенных расчетных выражений следует, что оперативное время зависит от числа слоев, способа разбиения на слои, выбранной стратегии обхода слоя, средней скорости перемещения пятна контакта. Видно также, что существенную долю оперативного времени составляют затраты t_{e1} на подготовку слоя к спеканию. Так, заменив традиционную схему формирования порошкового слоя (выдавливание порошка поршнем снизу), компания SLM Solutions разработала и запатентовала способ подачи порошка "сверху", позволивший сократить число ходов разравнивающего устройства, сократить время t_{e1} и за этот счет повысить производительность.

Влияние перечисленных факторов приводит к заметному различию времени построения для машин различных компаний. Например, время построения на SLM машинах трех разных производителей (одного формата, оснащенных лазерами приблизительно одной мощности – 500 Вт, 400 Вт и 400 Вт) пустотелой втулки диаметром 195 мм, высотой 165 мм и весом приблизительно 450 г, изготавливаемой из порошка АК-12, составляет 40, 28 и 20 ч соответственно при толщине единичного слоя 40 мкм.

Более грубая оценка машинного времени может осуществляться при известной величине объемной производительности установки на заданных режимах (Π_v) и расчетном объеме детали (V_p) с учетом возможных дополнительных построений:

$$t_m = V_p / \Pi_v. \quad (8)$$

Основным недостатком послойного синтеза изделий пространственно-сложной формы является относительно большая величина машинного времени обработки. Это приводит к высокой доле затрат C_a на амортизацию оборудования в калькуляции себестоимости. С учетом его высокой стоимости (по разным оценкам 0,3...1 млн. Евро в зависимости от производителя, типоразмеров, опций, условий поставки и пр.) эта статья затрат в ряде случаев становится определяющей. Так, по имеющимся данным доля затрат на амортизацию станка может достигать в отдельных случаях 70 % себестоимости изделия.

Для снижения себестоимости по этой статье затрат рекомендуется максимально повышать загрузку, эксплуатировать оборудование

без выходных, желательна в 2–3 смены. В связи с быстрым моральным износом такой техники срок окупаемости не должен превышать 5 лет. По мнению экспертов, в ближайшие годы следует ожидать заметного снижения цен на оборудование для SLS и SLM технологий, что благоприятно скажется на конъюнктуре продаж и темпах внедрения соответствующих технологий.

Важным преимуществом второго варианта технологии является резкое сокращение удельных затрат на инструмент и оснастку, как правило $\Delta C_{и} > 0$ и $\Delta C_{пр} > 0$. Расчет остальных составляющих выражения (5) затруднений не вызывает.

Для повышения экономических показателей при внедрении аддитивных технологий рекомендуется оснащать участок аддитивного формообразования несколькими машинами с различными возможностями, например, SLM 50 (100 Вт, диаметр пятна 12 мкм) + SLM 300 (400 Вт, 50 мкм):

- SLM машины с мощным лазером производительнее и обеспечивают более низкую технологическую себестоимость. Машины с менее мощным лазером и меньшим диаметром пятна обеспечивают лучшее качество поверхностного слоя изделий;

- распределение номенклатуры изделий разного типоразмера между машинами с различными габаритами рабочей зоны приводит к экономии порошка и сокращению вспомогательного времени.

К преимуществам аддитивных технологий, которые можно учесть при технико-экономическом обосновании относят также сокращение численности рабочих и затрат на обеспечение безопасности жизнедеятельности.

Эффективным направлением повышения производительности оборудования для аддитивного формообразования является разработка новых способов, отличных от послойного синтеза. Так, отметим появление способа аддитивного формообразования, основанного на объемном синтезе требуемой формы из жидкого интерфейса [11]. Этот способ – *continuous liquid interface production* (CLIP) – обеспечивает высокую скорость формообразования (в 25–100, а в перспективе, по мнению экспертов, до 1000 раз большую, чем способы послойного синтеза). Он также характеризуется изотропностью структуры и свойств объекта производства, низкой шероховатостью поверхности, высоким разрешением при печати изделия. Ожидается получение пространственно-сложного объекта, функциональные свойства которого соответствуют требованиям к готовому продукту, в режиме реального времени.

Отметим тенденцию к развитию техноло-

гий четвертого класса (см. табл. 1) и подчеркнем перспективность этого направления в технологии машиностроения. Такие технологии обеспечат дальнейшее сокращение длительности технологического цикла и позволят использовать достоинства, как субтрактивных, так и аддитивных технологий. Так, компания Solidica, разработала технологию UAM (*Ultra-sonic Additive Manufacturing*), на базе которой компания Fabrisonic выпускает гибридные станки типа SonicLayer R200, обеспечивающие аддитивно-субтрактивную обработку изделий из пластичных металлов и композиционных материалов с металлической или полимерной матрицей. Компания Mitsubishi LUMEX начала поставлять интегрированный комплекс Avance-25 Hermle обеспечивающий объединение SLS-технологий и 5-осного фрезерования. О подготовке к производству комплекса MPA-40, интегрирующего возможности 5-осного фрезерования и 3D-газодинамического напыления сообщила компания Hermle. Применение таких технологий и соответствующих станочных систем также потребует технико-экономического обоснования с учетом приведенных выше особенностей.

Следует подчеркнуть, что создание технологий и оборудования третьего и четвертого классов потребует не только скорейшего развития научных основ технологии машиностроения применительно к новым процессам и методам формообразования, но и опережающую подготовку инженерно-технических кадров, способных решать новые конструкторско-технологические задачи [12].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Промышленность, наука и образование – пути развития и ожидаемые результаты** / Общероссийская дискуссия. – М.: Союзмаш России, 2007. – 70 с.
2. **Григорьев С.Н., Смуров И.Ю.** Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // *Инновации*. 2013. №10. – С. 76–82.
3. **Сироткин О.С.** Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*. 2015. №2. – С. 22–25.
4. **Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.М.** Аддитивные технологии в машиностроении. – С.-Пб.: Издательство С.-Пб. политехнического университета. 2013. – 222 с.
5. **Научно-технические технологии машиностроительного производства.** Физико-химические методы и технологии / под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Форум. 2013. – 920 с.
6. **Металлообработка: высокотехнологичный режущий инструмент или аддитивные технологии?** // *Фотоника*. 2015. №3. – С. 36–39.
7. **Bourneaud F., Desagulier Ch.** From satellite to launcher, highlights on powder/wire ALM at Astrium Space Transportation/ Proc. 12th Conference on Space Structures, Materials and Environmental Testing / Noordwijk, The Netherlands, 2012 (ESA SP-691, July 2012).
8. **Волосова М.А., Окунькова А.А.** Пути оптимизации процессов селективного лазерного спекания при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012. №4. Т. 14. – С. 587–591.
9. **Расчеты экономической эффективности новой**

техники: справочник / под общ. ред. К.М. Великанова. – Л.: Машиностроение. 1990. – 448 с.

10. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / под ред. А.М. Дальского и др. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.

11. **Tumbleston J.R. and others.** Continuous liquid interface production of 3D objects / *Science*. 2015, 347. 1349.

12. **Бойцов А.Г., Моргун Ю.А., Саушкин Б.П.** Состояние и перспективы подготовки инженерных и научных кадров в области наукоемкого машиностроения // *Экономические стратегии*. 2015. № 4. – С. 12 – 19.

REFERENCES

1. Industry, science and education – ways of development and results expected / *All-Russian Discussion*. – М.: Soyuzmash of Russia, 2007. – pp. 70.

2. Grigoriev S.N., Smurov I.Yu. Trends of innovation additive production development in Russia and abroad // *Innovations*. 2013. №10. – pp. 76 – 82.

3. Sirotkin O.S. Current state and outlooks of additive techniques development // *Aircraft Industry*. 2015. №2. – pp. 22–25.

4. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutyulina I.M. *Additive Techniques in Mechanical Engineering*. – S.-Pb.: Publishing House of S.-Pb. Polytechnic University. 2013. – pp. 222.

5. *High Technologies in Mechanical Engineering. Physical – Chemical Methods and Techniques* / under the editorship of B.P. Saushkin. – М.: Forum. 2013. – pp. 920.

6. Metal processing: high-technology cutters or additive techniques? // *Photonics*. 2015. №3. – pp. 36 – 39.

7. Bourneaud F., Desagulier Ch. From satellite to launcher, highlights on powder/wire ALM at Astrium Space Transportation/ Proc. 12th Conference on Space Structures, Materials and Environmental Testing / Noordwijk, The Netherlands, 2012 (ESA SP-691, July 2012).

8. Volosova M.A., Okunkova A.A. Optimization ways of selective laser agglomeration processes by choice of processing strategy with laser beam // *Proceedings of Samara Scientific Center of RAS*. 2012. №4. Vol. 14. – pp. 587–591.

9. *Computations of New Technics Cost-Effectiveness: Directory* / under the general editorship of K.M. Velikanov. – Л.: Mechanical Engineering. 1990. – pp. 448.

10. *Technologist-Mechanician Directory*. In 2 Vol. Vol.2 / under the editorship of A.M. Dalsky et al. – М.: Mechanical Engineering-1, 2003. – pp. 944.

11. Tumbleston J.R. and others. Continuous liquid interface production of 3D objects / *Science*. 2015, 347. 1349.

12. Boitsov A.G., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. State and outlooks of engineering and scientific staff training in the field of high tech mechanical engineering // *Economic Strategies*. 2015. № 4. – pp. 12 – 19.

Рецензент д.т.н. И.И. Артёмов

УДК 681.7.069.24: 621.81-023.5
DOI: 10.12737/20598

В.В. Порошин, д.т.н.
(АНО «Институт Развития Новых Образовательных Технологий»),
А.В. Богданов, к.т.н.
(МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва),
И.А. Зябрев, аспирант
(АНО «Институт Развития Новых Образовательных Технологий») E-mail: vporoshin@mail.ru

Разработка способа аддитивного технологического процесса газопорошковой лазерной наплавки

Предложен способ лазерного послойного спекания частиц порошка со сканированием лазерного излучения по различным траекториям. Рассмотрено влияние траектории сканирования и скорости обработки на геометрические характеристики наплавленных слоёв.

Ключевые слова: лазер; наплавка; порошок; сканатор; дозатор; слой.

V.V. Poroshin, D.Eng.,
(ANO “Institute of New Educational Techniques Development”)
A.V. Bogdanov, Can.Eng.,
(Bauman STU of Moscow, Moscow)
I.A. Zyabrev, Post graduate student
(ANO “Institute of New Educational Techniques Development”)

Development of additive technological method for gas-powder laser surfacing process

The methods of additive techniques of layer-by-layer laser agglomeration of powder materials at a direct injection and mechanical powder feed are considered. A method for layer-by-layer surfacing with a scanning laser beam is offered. The paths of scanning on a line, ellipse and a circle are analyzed. Samples are processed and investigations on an influence of a processing velocity and the paths of scanning upon geometrical adjectives of layers obtained are carried out. The investigation results obtained allowed drawing a conclusion of the optimality of a scanning path of a laser beam on an ellipse, on geometrical adjectives and a coefficient of powder use.

Keywords: laser; surfacing; powder; scanator; dispenser; layer.

В настоящее время во всем мире проводятся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию технологий и систем послойного лазерного синтеза объемных изделий (ЛСОИ) для различных отраслей промышленности. Такие системы позволяют резко ускорить и удешевить процесс внедрения новой техники на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначально-го макета в натуральную величину [1].

Данные технологические процессы относятся к классу Direct Manufacturing или Additive Manufacturing (аддитивное производство) и представляют собой непосредственное изготовление трехмерных деталей без использования промежуточных операций по обработке заготовок.

Основные преимущества метода послойного лазерного спекания – это возможность в автоматизированном режиме фактически получать трехмерные изделия по их компьютерной модели. При этом сокращается время и затраты на получение изделия, т.к. исключаются промежуточные стадии изготовления оснастки и пресс-форм, отсутствуют дефекты литья и снижается трудоемкость финишной механической обработки [2].

В основе данного процесса используется метод послойного лазерного спекания порошков (LAM – laseradditive manufacturing), предложенного американской компанией AeroMet. Его суть заключается в использовании сканирующего лазерного луча для расплавления порошковых материалов и послойного выплавления детали заданной формы. Для этого применяются два способа подачи порошка в зону плавления: вместе с инертным газом с помощью сопла (рис. 1) и механически из специальной камеры (рис. 2).

Недостатком данных способов и устройств является получение наплавленных слоёв с размерами, ограниченными размером лазерного сфокусированного пятна, отсутствие возможности изменения энерговклада лазерного излучения, высоты наплавленного слоя.

Авторами предложен способ лазерного послойного спекания путём прямого инжектирования частиц порошка, основанный на процессе газопорошковой лазерной наплавки [3], позволяющий осуществлять:

- оптимизацию энерговклада за счет перемещения остро сфокусированного лазерного луча по изменяемым траекториям с регулируемой амплитудой и частотой;

- изменение распределения порошка по траектории сканирования лазерного луча для получения равномерного наплавленного слоя;
- повышение производительности процесса за счет увеличения зоны обработки путем сканирования лазерного излучения.

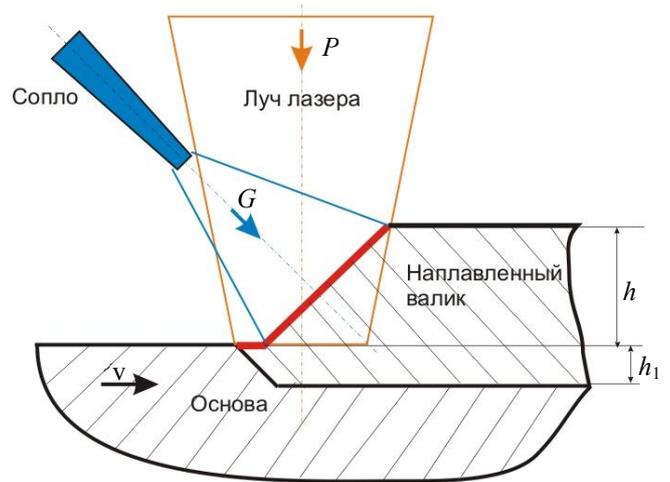


Рис. 1. Схема подачи порошка и инертного газа с помощью бокового сопла

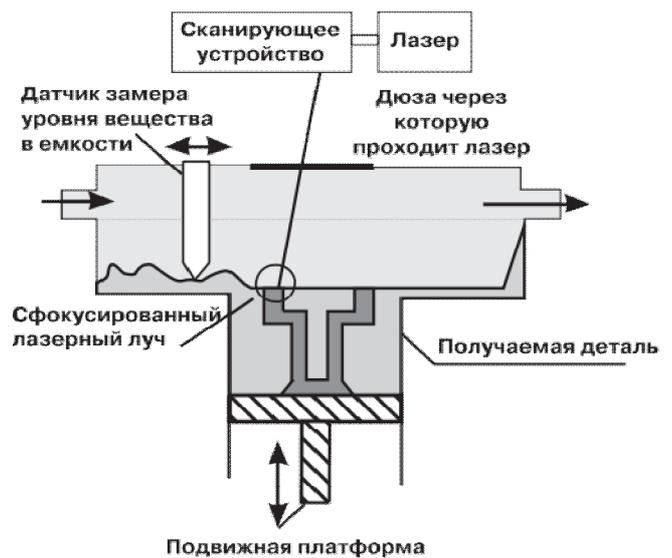


Рис. 2. Схема подачи порошка механически из специальной камеры

Общая схема предложенного способа представлена на рис. 3.

С увеличением частоты с 50 до 150 Гц наблюдается рост высоты наплавки и уменьшение зоны сплавления валика с основным материалом. Скорость перемещения лазерного луча по траектории сканирования изменяется с $v = 1,1$ мм/с и достигает 3,5 мм/с при частоте 150 Гц, что является оптимальной с точки зрения энерговложения. Дальнейшее увеличе-

ние частот 200 и 250 Гц показало снижение высоты валиков, что связано с большой скоростью $v = 4,6...5,9$ мм/с перемещения лазерного луча по траектории сканирования.

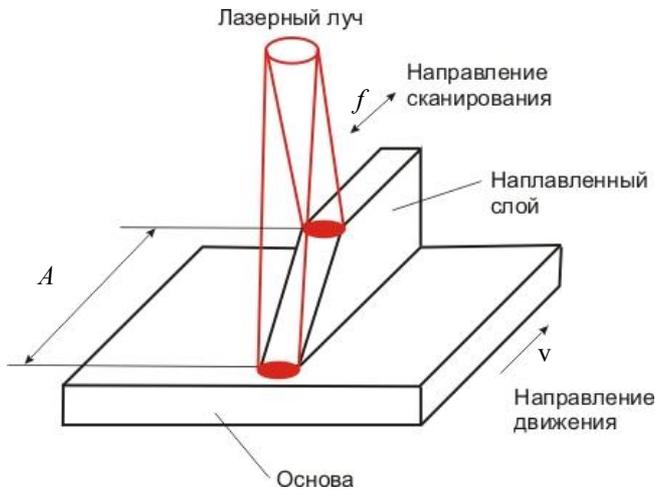


Рис. 3. Общая схема продольного сканирования лазерного луча по прямой

Новизна представленного способа состоит в следующем: сфокусированный лазерный луч сканируется по наплавляемой поверхности по прямой или эллипсной траектории соосно направлению перемещения (рис. 4). В специально разработанное 3-х камерное боковое сопло подаётся газопорошковая смесь от дозирующего устройства, формируя конусный факел газопорошковой струи на выходе. Наплавляемая поверхность располагается вне зоны фокуса факела газопорошковой струи, но в фокусе лазерного луча. Таким образом, лазерный луч на наплавляемой поверхности инициирует ванну расплава, в которую вдувается порошок, порошок плавится, формируя наплавленный валик, в то время, пока воздействует луч.

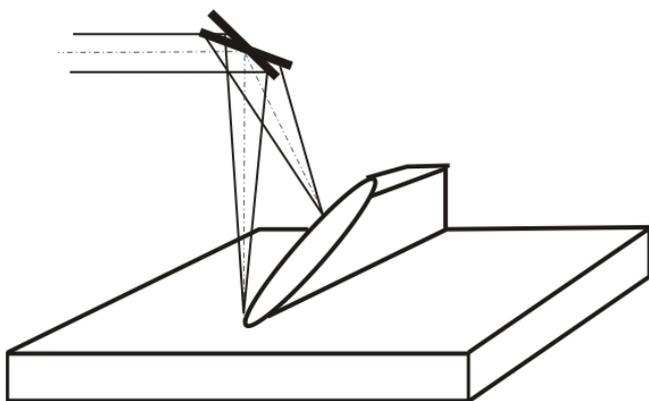


Рис. 4. Схема продольного сканирования по эллипсной траектории

Изменение зазора между внутренней и внешней частью сопла даёт возможность регулировать ширину газопорошкового потока. При использовании двух различных сопел, расположенных соосно направлению движения лазерного луча, возможна подача газопорошковых струй с различными химическими составами порошков, а независимая регулировка расходов порошка позволит изменять долю их участия в общем наплавленном слое (рис. 5).

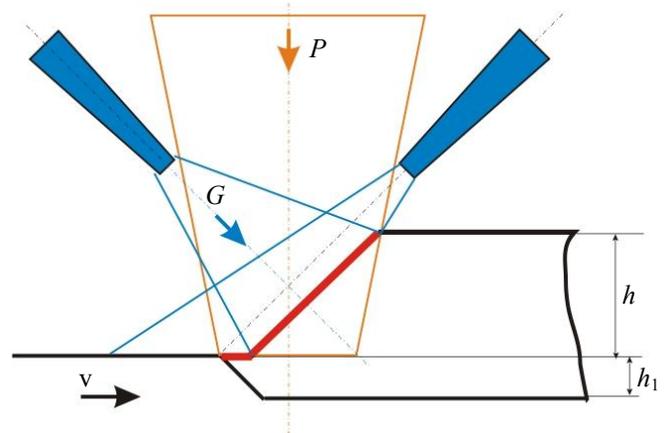


Рис. 5. Схема наплавки с помощью двух газопорошковых сопел

Эксперименты проводились с использованием излучения непрерывного CO_2 -лазера мощностью 2 кВт. В качестве присадочного материала использовался порошок Ni-Cr-B-Si сплава, который подавался в зону наплавки специальным дозирующим устройством. Расход порошка и газа не изменялся. Подложкой служили образцы из стали 45. Скорость перемещения образцов составляла 2...10 мм/с. Лазерный луч, сфокусированный в пятно диаметром 1,0 мм на поверхности, падал на образец вертикально, а порошок подавался из бокового сопла. Фокус газопорошковой струи находился в центре траектории и был заглублён на 5 мм. Сканирование луча производилось специально разработанным устройством по линии, эллипсу и окружности с частотой 150 Гц и амплитудой 8 мм. Частота выбрана по итогам экспериментов, проведенных с целью выявления влияния частоты сканирования лазерного луча на геометрические параметры наплавленных слоёв. Исследовалось сканирование с частотами 50, 100, 150, 200 и 250 Гц (рис. 6).

На частоте 200 Гц, в диапазоне скоростей обработки 5...8 мм/с, уменьшение высоты происходит более плавно, в отличие от режимов с частотами 50...150 Гц.

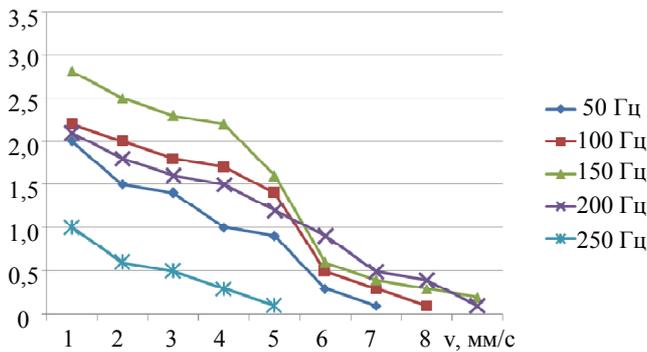


Рис. 6. Зависимость высоты наплавленного слоя h от скорости v и частоты сканирования

Обработка результатов эксперимента позволила сделать вывод об оптимальной частоте 150 Гц, при получении наибольшего по высоте качественного наплавленного слоя.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 7 показывают, что при обработке со сканированием лазерного луча по линии, слой имеет стабильную форму до 5 мм/с, далее идет резкое падение толщины слоя, что объясняется недостатком энергии лазерного луча на расплавление присадочного материала. Высота наплавки максимальна, но ширина валика ограничена размерами лазерного пучка.

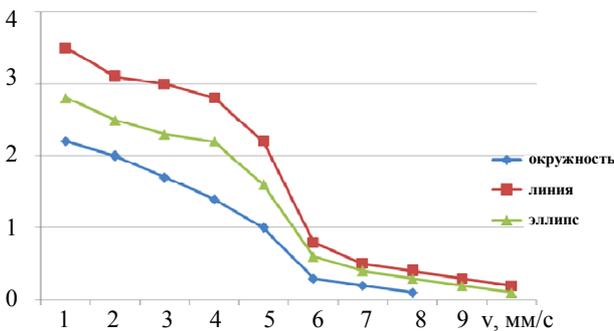


Рис. 7. Зависимость высоты наплавленного слоя h от скорости v и траектории сканирования

При наплавке со сканированием по окружности высота образовавшегося слоя также снижается с увеличением скорости обработки. Это объясняется тем, что длина траектории сканирования лазерного луча по окружности больше длины траектории при сканировании по линии в 3,14 раза, а следовательно и энергозатрат в зоне обработки меньше.

Наилучшие результаты были получены со сканированием лазерного луча по эллипсной траектории, стабильный слой наблюдался при скорости обработки 2...4 мм/с, что объясняется оптимальной вложенной энергией по траектории сканирования. Следует заметить, что при скорости обработки 1,0 мм/с хотя и на-

блюдался рост высоты наплавленного слоя, но был замечен явный перегрев основного материала.

Наибольшая ширина слоя была получена при сканировании по окружности, что определялось шириной траектории.

Анализ полученных данных, исследование наплавленных слоёв образцов дали возможность сделать вывод о том, что коэффициент использования порошка (Кип) максимален при наплавке со сканированием лазерного луча по эллипсной траектории и доходит до 86 %. При линейной траектории Кип составляет 57 %, при окружности – 64 %.

Учитывая особенности применения лазеров в промышленности в целом [4] и успешное внедрение волоконных лазеров в частности [5], целесообразно опробовать разработанную технологию и оборудование применительно к ним.

Выводы

1. Оптимальной частотой сканирования, с «энергетической» точки зрения является 150 Гц.
2. Оптимальной траекторией сканирования сфокусированного лазерного луча с точки зрения геометрических характеристик и качества наплавленного слоя является эллипс.
3. При сканировании по эллипсной траектории коэффициент использования порошка доходит до 86 %.
4. Инжектирование порошкового материала производится соплом в зоне расфокусировки газопорошкового потока в соответствие с траекторией сканирования.
5. При использовании двух различных боковых сопел, расположенных соосно направлению движения лазерного луча, возможна подача газопорошковых струй с различными химическими составами порошков, а независимая регулировка расходов порошка позволит изменять высоту наплавленных слоев и долю их участия в общем наплавленном слое.

Таким образом, использование способа лазерного послойного спекания путём прямого инжектирования частиц порошка со сканированием луча позволит увеличить производительность процесса при сохранении всех преимуществ лазерной технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишковский, И.В., Щербаков, В.И., Петров, Л.А. Лазерный синтез огнеупорной керамики из порошков Al и CrO₂ // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 3. – С. 45–48.
2. Федотов, А.В. Новые технологии производства аэрокосмических материалов и сплавов // РИТМ. – 2011. – №5. – С. 32–35.

3. Шляпин, А.Д., Порошин, В.В., Зябрев, И.А. Лазерная наплавка со сканированием излучения / Сб. науч. тр. Евразийский союз ученых. Междунар. научно-практическая конф. «Современные концепции научных исследований». Ч. 2, – 2015. – №6(15). – С. 89–91.

4. Богданов, А.В. Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров // Технология машиностроения. – 2011. – № 11. – С. 34–36.

5. Богданов, А.В., Грезев, Н.В., Шмелев, С.А. Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 6 (48). – С. 30–4.

REFERENCES

1. Shishkovsky, I.V., Shcherbakov, V.I., Petrov, L.A. Laser synthesis of refractory ceramics of Al and CrO₂ powders //

Physics and Chemistry of Material Processing. – 2001. – № 3. – pp. 45–48.

2. Fedotov, A.V. *New Techniques of Aerospace Material and Alloy Manufacturing* // RITM. – 2011. – №5. – pp. 32–35.

3. Shlyapin, A.D., Poroshin, V.V., Zybrev, I.A. Laser surfacing with radiation scanning / *Proceedings of Eurasian Union of Scientists. Inter. Scient.-Pract. Conf. "Modern Concepts in Scientific Researches"*. Part 2, – 2015. – №6(15). – pp. 89–91.

4. Bogdanov, A.V. Estimate peculiarities of engineering laser technological potentialities // *Engineering Techniques*. – 2011. – № 11. – pp. 34–36.

5. Bogdanov, A.V., Grezev, N.V., Shmelev, S.A. Fiber laser application for increase of wear resistance and contact fatigue of railway wheels // *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 6 (48). – pp. 30–4.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

УДК 621.9.529

DOI: 10.12737/20599

С.В. Курынцев, к.э.н.,

К.Ю. Нагулин, к.ф.-м.н.,

А.И. Горунов, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

420111, Россия, г. Казань, ул. К.Маркса, 10)

E-mail: kuryntsev16@mail.ru

Аддитивные технологии – третья промышленная революция*

Представлен обзор отечественной и зарубежной литературы на тему аддитивные технологии – третья промышленная революция. Подробно рассмотрены два основных метода аддитивных технологий: технология послойного спекания или плавления, технология на основе металлической наплавки.

Ключевые слова: аддитивные технологии; 3D-принтинг; спекание; плавление; лазерный луч; электронный луч; наплавка.

S.V. Kuryntsev, Can.Eng.,

K.Yu. Nagulin, Can. Ph-Math.,

A.I. Gorunov, Can.Eng.

(FSBEI HE "Tupolev National Research Technical University of Kazan –KAI"

10, K Marx Str., Kazan 420111, Russia)

Additive Techniques – the third industrial revolution *

This paper reports two basic methods of additive techniques, a method of layer-by-layer agglomeration or metal powder melting and a method based on metal surfacing technique. A thorough description of the routine methods of additive techniques their advantages and disadvantages, a product range and field of product application are presented. Basic problems arising at the use of additive techniques and produce manufactured such as the certification of initial material, technology certification, production process control in its development, test procedure of parts manufactured are touched upon. The peculiarities of behavior of blanks obtained through additive techniques at further technological operations, for example, at laser welding are described. Basic trends in researches carried out by leading scientists in the field mentioned are emphasized.

Keywords: additive techniques; 3D printing; agglomeration; melting; laser beam; electronic beam; surfacing.

В 21 веке в постиндустриальных странах традиционное субтрактивное производство,

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации Грант РФФИ ОФИ-М №14-29-10281.

основанное на удалении исходного материала (резание и пр.), уже не справляется с неуклонно усложняющимися технологическими требованиями, особенно в случае сложноконфигурированных конструкций и изделий из ком-

позитных материалов. Так, при изготовлении сложнопрофильных фильтров и теплообменников приходится задействовать десятки различных технологических операций, для каждой необходима своя оснастка, изделие получается составным, с остаточными напряжениями и увеличенной себестоимостью. Зачастую возможности традиционной технологии тормозят простор конструкторской мысли и, в конечном итоге, получаем изделие, технологически оптимальное в ущерб его функциональным свойствам.

На помощь традиционным методам приходят инновационные аддитивные технологии [1], в которых процесс «вычитания» вещества из исходной заготовки заменяется его послойным наращиванием. Преимущества этого подхода очевидны – снижение материалоемкости, стоимости (особенно для деталей сложной формы) и, что самое главное, широчайшие возможности создания изделий из градиентных композитных материалов с заранее заданными свойствами.

Структурно аддитивные технологии можно классифицировать на несколько основных групп:

– послойное спекание порошка, лазерным либо электронным лучом, (PBS – Powder Bed System, SLM – Selective Laser Melting, SLS – Selective Laser Sintering);

– послойное выращивание лазерной наплавкой с использованием металлического порошка (PFS – Powder Feed System, LC – Laser cladding);

– послойное выращивание лазерной наплавкой с использованием металлической проволоки либо ленты (WFS – Wire Feed System).

Высокую востребованность результатов исследований в области ЛА технологий наглядно демонстрирует ежегодный устойчивый 25...30 %-ный рост рынка 3D-принтеров, использующих методы SLM. По прогнозам Wohlers Associates к 2017 г. объем мировых продаж 3D-принтеров составит порядка 6 млрд. долл. [1].

Непрерывно растут не только объемы реализации ЛА технологического оборудования, но и расширяются области его применения. Лидерами являются производство потребительских товаров и электроники (24 %), автомобилестроение (19 %), медицина (14 %) и машиностроение (10 %), аэрокосмическая промышленность (8 %).

Прогресс в этой области существенно заторможен крайне узким перечнем рабочих материалов, развитие столь важного направле-

ния происходит в большинстве случаев «вслепую» – технологии, показавшие прекрасные результаты с одним веществом, напрочь отказываются работать с другим, казалось бы «родственным» материалом [1]. Такое состояние дел недопустимо при серийном производстве деталей и относится больше к области «технологического искусства».

Поэтому глобальная цель многочисленных исследований, проводимых научным сообществом – сделать ЛА технологии более «прозрачными» и доступными для рядового пользователя и, что самое главное, они должны быть адаптированы для серийного производственного цикла.

Весь широкий спектр научных исследований в области ЛА технологий можно условно классифицировать на несколько основных групп:

- экспериментальные и теоретические исследования физико-химических процессов, протекающих в газовой фазе и в ванне расплава в ходе процесса создания изделия;

- экспериментальные исследования, связанные с обработкой различных технологических режимов и комбинаций «подложка – наращиваемый материал»;

- разработка нового и модификация существующего оборудования, реализующего ЛА технологии.

1. Аддитивные технологии на основе послойного спекания

Технологии, основанные на использовании лазерных и электронно-лучевых технологий невысокой мощности, имеют общее название PBS – Powder Bed System (система с порошковой емкостью) [1]. Однако последние модели подобных установок оснащены многолучевой системой сканирования и мощность, например, лазеров доходит до 1000 Вт, тогда как, используя однолучевые системы можно получать удовлетворительные результаты при мощности 50 Вт.

На рис. 1 представлена принципиальная схема послойного лазерного спекания, реализующая технологию по следующей схеме: на предварительно подогретую поверхность наносится слой порошка, затем роликом выравнивается до заданной толщины (20...50 мкм), лучом порошок спекается или плавится только в заданных программой точках, таким образом, получается один слой. На следующем этапе бункер с подложкой опускается на 20... 50 мкм, а бункер с порошком поднимается на соответствующую высоту, роликом порошок выравнивается, луч его спекает и так

десятки или сотни раз. В некоторых случаях слой уже спеченного порошка спекается лучом повторно. Это влияет на пористость и механические свойства [3, 4].

Технология спекания порошка в свою очередь подразделяется на спекание электронным лучом, спекание лазерным лучом.

Как постоянно конкурирующие технологии электронно-лучевые и лазерные имеют свои преимущества и недостатки [1 – 5]. Лазерное спекание порошка не требует вакуума, но имеет небольшую скорость сканирования лучом, осуществляемое механически оптикой скорость сканирования 200 мм/с, что является одной из причин низкой производительности (15...70 см³/ч). Электронно-лучевое спекание требует вакуум (1x10⁴ Бар), а производительность около 60...90 см³/ч за счет высокой скорости сканирования лучом 300... 400 мм/с и большего диаметра луча, до 1 мм².

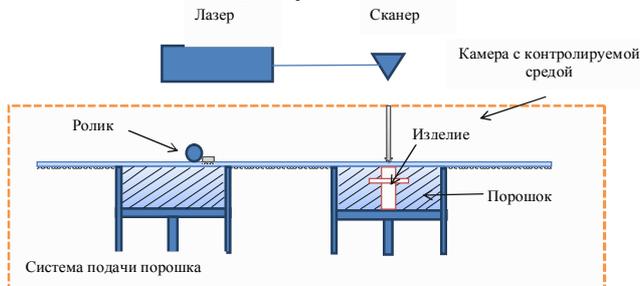


Рис. 1. Принципиальная схема аддитивной технологии на основе послойного лазерного спекания

В настоящее время основным производителем электронно-лучевых машин аддитивного производства является шведская компания «ARCAM», а лазерных – немецкая компания «SLM Solutions GmbH», которая выпустила установку SLM 500, оснащенную четырехлучевой системой сканирования и достаточно мощным лазером, что позволяет увеличить производительность с 15 (SLM 125) до 70 (SLM 500) см³/ч. Следует отметить, что современные машины оснащены герметичными камерами с защитной средой, заданной температурой охлаждения и сопутствующего подогрева до 1000 °С [5, 6].

Обе технологии имеют множество приемов и решений. Для спекания и плавления лучом большое значение имеет размер и форма (гранулометрия) частиц используемого порошка, так как в некоторых случаях размер частицы совпадает с диаметром луча в фокусе. В случае крупных частиц (200...300 мкм), лазерный луч может расплавить их не полностью, что приведет к несплошностям и ухудшению механических свойств. Механические свойства

образцов полученных аддитивными технологиями сравнимы с литыми или штампованными образцами из соответствующих сплавов [1 – 3], а в некоторых случаях могут быть выше, ввиду высоких скоростей охлаждения и стабильной мелкодисперсной структуры.

В работе [1] представлен обзор по теме металлическое аддитивное производство, где затронуты вопросы сертификации изделий и оборудования, аттестации персонала и технологии производства. Подняты вопросы потенциала аддитивных технологий на уровне бизнес-обществ, проведено сравнение заготовок, полученных литьем и аддитивными технологиями, по себестоимости в зависимости от размера партии, проанализированы зависимости усталостной прочности от шероховатости поверхности и пористости изделий, механических свойств от скорости охлаждения.

В работе [2] авторами проведены подробные исследования процесса DMLS (Direct Metal Laser Sintering – точное металлическое лазерное спекание) разных порошков: мартенситностареющей стали, никелевого сплава Inconel 718 и сплава на основе кобальта, мощность лазера 200 Вт. Изготовленные лазерным спеканием образцы, подвергали термической обработке при разных температурах (650, 850, 1000 °С), времени выдержки (2 ч) и охлаждению в разных средах (азот, вакуум, воздух). После спекания структура представляла так называемые «ногтевидную структуру» (finger nails), после термической обработки подобная неоднородная структура исчезала, т.е. происходила её гомогенизация.

Авторами работы [3] описана технология селективного лазерного плавления (СЛП) с применением иттербиевого волоконного лазера с непрерывным излучением при мощности $P = 50$ Вт и диаметром лазерного пятна на поверхности порошкового слоя около 70 мкм. При подготовке эксперимента проводился гранулометрический анализ, с целью выявления формы частиц и частоты их поверхности.

Приведены различные стратегии сканирования лазерным лучом, что существенно влияет на пористость металла полученных деталей, а соответственно и на механические свойства. В некоторых машинах СЛП, емкость с порошком находится в закрытом состоянии и не контактирует с окружающей средой. Существенную роль, оказывающую влияние на механические свойства играет скорость кристаллизации, которая зависит от температуры окружающей среды, поэтому применяют камеры

для СЛП с контролируемой температурой (до 1000 °С).

В работе [5] описан процесс гибридной лазерно-дуговой сварки заготовки из кованой стали и заготовки полученной SLM-процессом (SLM – Selective Laser Melting – селективное лазерное плавление). Отмечены достаточно высокие механические свойства заготовок полученных данным способом, предел прочности сварного соединения из кованой стали 550...580 МПа, сварного соединения «кованная сталь – SLM-заготовка» 580...610 МПа, однако, пластичность последнего ниже на 50 %. Авторы делают вывод о возможности получения сварного соединения SLM-заготовки и кованой стали при помощи гибридной лазерно-дуговой сварки.

Авторы [4] акцентируют внимание на теплофизике процесса СЛП, в частности поглощающая способность лазерного излучения металлического порошка выше, чем у литого металла, зависит она так же от гранулометрического состава. По мнению авторов одной из проблем СЛП является фрагментация трека, так называемый процесс «каплеобразования» (balling-effect). Данный эффект зависит от мощности лазера, скорости сканирования, толщины слоя и природы порошка, материала подложки и его температуры.

Работа [6] посвящена отработке технологии формирования единичного трека, для этого авторы использовали порошок SS904L, изменяли мощность лазерного излучения ($P = 25, 50$ Вт), скорость сканирования лучом (0,03...0,24 м/с), толщину слоя порошка на подложке (0...400 мкм). Отмечено, что скорость равномерного нагрева частицы порошка диаметром 25 мкм около 40 мкс, при некоторых режимах использованных в эксперименте, время облучения частицы составляет 2,3...1,1 мс, т.е. большее время облучению подвергается уже расплавленный металл.

Авторами [7] описаны результаты экспериментов по СЛП образцов из никелида титана, использовалось лазерное излучение мощностью 50 Вт, скорость сканирования изменялась в диапазоне 60...220 мм/с, применялся предварительный подогрев порошковой смеси ($T_{\text{кам}} = 20, 300, 500$ °С), в результате эксперимента при определенных режимах были получены образцы с плотностью 97 %.

Описанные выше результаты позволяют сформировать представление о таком уникальном методе получения изделий как послойное лазерное спекание. Изучение лазерного спекания титанового порошка открывает

широкие возможности внедрения технологии 3D-прототипирования в современном авиастроении, а высокая точность изготовления изделий и получение тонких структур из порошковых материалов на основе никеля уже находят свое применение в производстве лопаток газовых турбин.

2. Аддитивные технологии на основе металлической наплавки

Основой технологии точного металлического осаждения (DMD – Direct Metal Deposition) является лазерная наплавка, где в качестве рабочего материала используется металлический порошок, либо проволока при мощности лазерного излучения 1000...5000 Вт. Сущность метода заключается в послойном выращивании заготовки лазерной или электронно-лучевой наплавкой, наплавочные валики выращивают в соответствии с компьютерной моделью (рис. 2). Производительность данного процесса по скорости расхода порошка гораздо выше, в сравнении с СЛП, однако точность, коэффициент использования порошка, качество поверхности изделия, плотность – ниже.

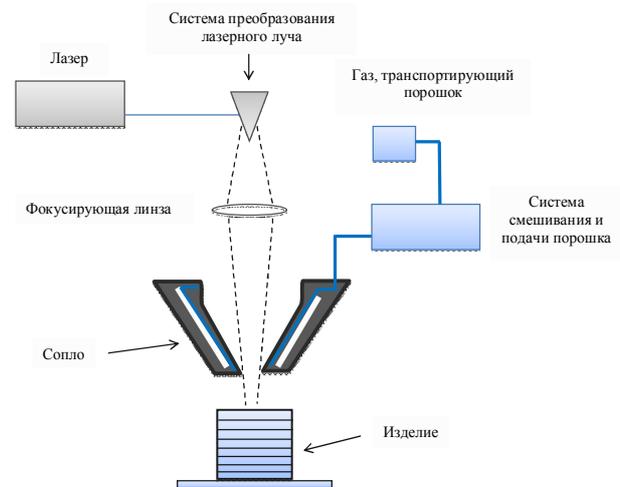


Рис. 2. Принципиальная схема аддитивной технологии на основе лазерной наплавки

Преимуществами является относительно большая ванна расплава и более низкие требования к гранулометрии порошка. Оборудование можно использовать, как для DMD-технологии, так и для классической наплавки, порошком, проволокой и лентой. Применяются установки, оснащенные модулями сканирования лазерным лучом, что так же имеет свои технологические преимущества, увеличение производительности [8, 9], возможность смешивать и наносить сложные металлические композиции, имеющие ограниченную растворимость в жидком состоянии.

Основными технологическими параметрами являются мощность лазерного излучения; скорость сканирования лучом; скорость подачи присадочного материала (порошка, проволоки, ленты); гранулометрический состав порошка; расход и давление газов (транспортный, защитный); диаметр лазерного пятна на поверхности подложки; температура подложки.

В работе [8] представлен пример проведения полного факторного эксперимента по определению зависимости между геометрией единичного валика (длина, ширина, коэффициент смешивания с подложкой) и основными технологическими параметрами: мощность лазера, скорость сканирования и расход порошка. Полученные валики имели длину 25 мм, слои получали наложением валиков с шагом 3 мм, заготовку – наложением слоев, использовались композиции порошков стали 14ХНЗМА и карбида титана в разных пропорциях. Ни технологии литья металла, ни порошковая металлургия не имеют технологических возможностей получения трехмерного изделия, имеющего заданную микроструктуру разного типа в одном объеме.

В работе [9] описаны исследования процесса наплавки с использованием мощного волоконного лазера (15 кВт). Наплавку производили порошком, используя щелевое сопло, проволокой используя сварочную горелку для подачи, так же использовался режим сканирования лучом по поверхности детали по разным траекториям (синусоидальной и треугольной). Проведены коррозионные испытания наплавленного и основного металла, сделаны выводы о высоких показателях производительности при использовании мощного волоконного лазера для наплавки. Порошковую лазерную наплавку лучше использовать для прецизионного нанесения (1...3 мм) с минимальным термическим влиянием на подложку или, например, на восстанавливаемую деталь и минимальным смешиванием наплавленного и основного металла с целью сохранения свойств металла детали, такой процесс можно проводить при мощности лазерного излучения 0,7...1,5 кВт.

В работе [10] исследованы трибологические свойства покрытий интерметаллидом на базе NiAl. Перед экспериментом (лазерной наплавкой) исследователи проводили анализ смешанного порошка (Ni+Al), наплавку производили на средних мощностях (2...4 кВт) с предварительным подогревом подложки до 300 °С и заданной скоростью охлаждения.

Производили оценку всех валиков, за исключением первого и последнего. Сделаны выводы: режимы наплавки (скорость и мощность лазера) имеют большое влияние на микроструктуру, адгезию, трибологию и поверхностное поведение покрытий на основе интерметаллида NiAl.

В работе [11] приведены результаты исследований процесса DMD (Direct Metal Deposition), то есть выращивание заготовок путем послойной наплавки лазером металлического порошка, сравнение с дуговым способом. Показано влияние термического воздействия и стратегии выращивания валиков на механические свойства заготовки.

Исследователями [12] описан процесс дуговой наплавки в среде активных газов порошка из нитрида титана TiN на заготовку из сплава Ti-6Al-4V, приведены несколько моделей металлургического взаимодействия в процессе наплавки. Микротвердость заготовки 300...320 HV1.0, наплавленного слоя 700...720 HV1.0, коэффициент трения наплавленного слоя в 15 раз выше, чем заготовки.

В работе [13] представлен обзор аддитивных технологий, перспективы их применения и основные ограничения, приведены четыре основные технологии: выращивание из материала в жидкой фазе, ламинарное послойное спекание, выращивание лазерной наплавкой, послойное спекание порошка. Выделены технология на основе послойного спекания порошка и технология наплавки, рассматривается технология ламинарного 3D-принтинга (LOM – Laminated Object Manufacturing), т.е. когда в качестве рабочего материала используется лист толщиной 50..200 мкм, от которого лазерным лучом отрезается не нужная часть, в соответствии с CAD-моделью, а нужная спекается лазером, затем от рулона отмеряется следующий слой, процесс повторяется, аналогично послойному порошковому спеканию или плавлению.

Выводы:

1. Несомненно, аддитивные технологии являются перспективными для изготовления заготовок или практически готовых деталей, быстрое металлическое прототипирование по CAD-модели не имеет конкурентов.

2. Аддитивные технологии на сегодняшний день зарекомендовали себя в медицине и машиностроении, есть перспективы применения в авиации и космосе. Однако требуется время на полный цикл испытаний не только деталей и заготовок в имитационных условиях эксплуатации, но и конструкции со-

бранной из деталей, созданных посредством аддитивных технологий. Из этого следует, что понадобится время на использование аддитивных технологий при производстве ответственных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

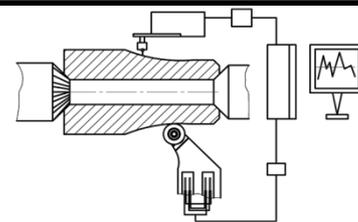
1. **William E. Frazier** Metal Additive Manufacturing: A Review Journal of Materials Engineering and Performance (2014) 23:1917 – 1928.
2. **Sanz, V. Garcia Navas** Structural integrity of direct metal laser sintered subjected to thermal and finishing treatments. Journal of Materials Processing Technology. 213 (2013) 2126–2136.
3. **Смуров И.Ю., Ядройцев И.А., Мовчан И.А., Окунькова А.А., Черкасова Н.Ю., Антоненкова Г.В.** Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ // Вестник МГТУ «Станкин». № 1 (18). 2012. С. 36 – 39.
4. **Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А., Окунькова А.А., Цветкова Е.В., Черкасова Н.Ю.** Аддитивное производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «Станкин». № 4 (17). 2011. С. 144 – 146.
5. **Giuseppe Casalino, Sabina Luisa Campanelli, Antonio Domenico Ludovico.** Laser-arc hybrid welding of wrought to selective laser molten stainless steel International Journal of Advanced Technologies (2013) 68:209 – 216.
6. **Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А., Окунькова А.А., Конов С.Г. Антоненкова Г.В.** Экспериментальное аддитивное прямое производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «Станкин». № 2 (20). 2012. С. 48 – 50.
7. **Шишковский И.В., Ядройцев И.А., Смуров, И.Ю.** Создание объемных изделий из никелида титана методом послонного лазерного плавления // Письма в ЖТФ. 2013. Том 39, вып. 24. С. 15 – 21.
8. **Григорьянц А.Г., Новиченко Д.Ю., Смуров, И.Ю.** Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // Известия высших учебных заведений. 2011. № 7. С. 38 – 46.
9. **Турчинин А.Г., Земляков Е.В., Поздеева Е.Ю., Туоминен, Я., Вуористо, П.** Технологические возможности лазерной наплавки с использованием мощных волоконных лазеров // МиТОМ. 2012. № 3 (681). С. 35 – 40.
10. **Youjun Yu** and other Preparation, microstructure and tribological behavior of laser cladding NiAl intermetallic compound coatings. WEAR 274 – 275 (2012) 298 – 305.
11. **L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov** Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactor components // Journal of Nuclear Materials 385 (2009) 236–241.
12. **Yu-Chi Lin, Yuan-Ching Lin, Yong-Chwang** Evolution of the microstructure and tribological performance of Ti-6Al-4V cladding with TiN powder Chen Materials and Design 36 (2012). 584 – 589.
13. **Yuwei Zhai, Diana A. Lados, Jane L. Lagoy** Additive

Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation // The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society JOM. Vol. 66. No. 5, 2014. Pp. 808 – 816.

REFERENCES

1. **William E. Frazier** Metal Additive Manufacturing: A Review Journal of Materials Engineering and Performance (2014) 23:1917 – 1928.
2. **Sanz, V. Garcia Navas** Structural integrity of direct metal laser sintered subjected to thermal and finishing treatments. Journal of Materials Processing Technology. 213 (2013) 2126–2136.
3. **Smurov, I.Yu., Yadroitsev, I.A., Movchan, I.A., Okunkova, A.A., Cherkasova, N.Yu., Antonenkova, G.V.** Additive laser production. Experimental work carrying out // Bulletin of MSTU “Stankin”. № 1 (18). 2012. pp. 36 – 39.
4. **Smurov, I.Yu., Movchan, I.A., Yadroitsev, I.A., Okunkova, A.A., Tsvetkova, E.V., Cherkasova, N.Yu.** Additive laser production // Bulletin of MSTU “Stankin”. № 4 (17). 2011. pp. 144 – 146.
5. **Giuseppe Casalino, Sabina Luisa Campanelli, Antonio Domenico Ludovico.** Laser-arc hybrid welding of wrought to selective laser molten stainless steel International Journal of Advanced Technologies (2013) 68:209 – 216.
6. **Smurov, I.Yu., Movchan, I.A., Yadroitsev, I.A., Okunkova, A.A., Konov, S.G., Antonenkova, G.V.** Experimental additive direct production aided by laser // Bulletin of MSTU “Stankin”. № 2 (20). 2012. pp. 48 – 50.
7. **Shishkovsky, I.V., Yadroitsev, I.A., Smurov, I.Yu.** Creation of titanium nickelin volumetric products by method of layer-by-layer laser melting // Letters to JTF. 2013. Vol. 39, issue 24. pp. 15 – 21.
8. **Grigoriyants, A.G., Novichenko, D.Yu., Smurov, I.Yu.** Laser additive techniques for production of coatings and parts made of composite // Proceedings of Colleges. 2011. № 7. pp. 38 – 46.
9. **Turchinin, A.G., Zemlyakov, E.V., Posdeyeva, E.Yu., Tuominen, Ya., Vuoristo, P.** Technological Potentialities of Laser Surfacing with Use of Power Fider Lasers // MiTOM. 2012. № 3 (681). pp. 35 – 40.
10. **Youjun Yu** and other Preparation, microstructure and tribological behavior of laser cladding NiAl intermetallic compound coatings. WEAR 274 – 275 (2012) 298 – 305.
11. **L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov** Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactor components // Journal of Nuclear Materials 385 (2009) 236–241.
12. **Yu-Chi Lin, Yuan-Ching Lin, Yong-Chwang** Evolution of the microstructure and tribological performance of Ti-6Al-4V cladding with TiN powder Chen Materials and Design 36 (2012). 584 – 589.
13. **Yuwei Zhai, Diana A. Lados, Jane L. Lagoy** Additive

Рецензент д.т.н. В.В. Непомилуев



Актуальность внедрения концепции «индустрия 4.0» в современное машиностроительное производство

Раскрыто содержание концепции «индустрия 4.0». Выполнен обзор современных программных и программно-аппаратных средств повышения эффективности управления машиностроительным производством. Охарактеризованы целевые направления и критерии оценки эффективности внедрения киберфизических систем для реализации концепции «индустрия 4.0» в машиностроительном производстве.

Ключевые слова: «индустрия 4.0»; киберфизические системы; машиностроение; производственный процесс; эффективность производства.

A.R. Ingemansson, Can.Eng.
(“CDB “Titan” Co., Lenin Avenue, Volgograd, 400071Russia)

Urgency of “industry 4.0” concept introduction in modern mechanical engineering

The contents of the “Industry 4.0” concept are revealed. The basic principles of “Industry 4.0” concepts, “Internet things” and the contents of the so-called the “Fourth industrial revolution” are described. The promising trend in mechanical engineering due to the creation and integration of cyber-physical systems including technological, control, transport and other equipment is characterized. The review of current software and hardware tools for efficiency increase in mechanical engineering management of – MES-, APS-, SCADA-, MDC- systems. The purposeful trends and criteria of efficiency estimate in the introduction of cyber-physical systems for the realization of the “Industry 4.0” concept in mechanical engineering are characterized.

Keywords: “Industry 4.0”; cyber-physical systems; mechanical engineering; production process; production efficiency.

Уровень развития информационных технологий, достигнутый на сегодняшний день, способствует формированию новых возможностей в области обмена информацией и принятия решений на ее основе. Традиционно основной объем информации, производившейся датчиками, сенсорами и другими чувствительными и регистрирующими элементами технических систем, предназначался для человека, анализирующего полученную информацию и принимающего решение. На сегодняшний день открываются новые возможности обмена информацией между техническими системами и принятия решений технической системой, в т. ч. без участия человека. Данный аспект формирует содержание, т. наз., «четвертой промышленной революции» или

«интернета вещей» или «индустрии 4.0».

Исторически принято выделять три промышленных революции. Первая – связана с изобретением парового двигателя и соответствующим повышением эффективности техники и технологий в конце 18 века. Вторая промышленная революция связана с появлением конвейерного производства в начале 20 века. Третья – с внедрением промышленной электроники в производство в 70-х гг. 20 века. Настоящее время связано с формированием четвертой промышленной революции.

Рассмотрим основной принцип четвертой промышленной революции. На сегодняшний день уровень развития техники позволяет оснащать технические системы различными чувствительными элементами, способными

формировать массив данных о состоянии технической системы и внешнем воздействии на нее. Технические системы посредством каналов связи способны самостоятельно обмениваться данными и принимать решения по запрограммированному алгоритму. При этом объем данных, которые необходимо анализировать человеку для принятия окончательных решений, существенно уменьшается.

Приведем некоторые примеры указанного взаимодействия технических систем без участия человека. Так, один из ведущих мировых специалистов в области искусственного интеллекта – профессор В. Вальстер (Германия), приводит пример реализации данной концепции в логистике [1]. Продукт с заданной температурой хранения может во время транспортировки в холодильной камере контролировать температуру в камере с помощью киберфизических систем, установленных в упаковке. При превышении заданной температуры хранения упаковка генерирует сигнал и посылает его в систему грузового автомобиля-рефрижератора. Получив сигнал, система реагирует и понижает температуру в камере. Таким образом, непосредственное участие человека исключается. Описанная технология уже применяется при транспортировке пакетов с плазмой крови.

Необходимо указать отличие понятий «интернет вещей» и «индустрия 4.0».

Концепция и понятие «интернет вещей» («internet of things», «IoT») были сформулированы основателем исследовательской группы Auto-ID при Массачусетском технологическом институте Кевином Эштоном в 1999 г. Данный термин относится к реализации обмена информацией и принятия решений между техническими системами во всех сферах деятельности человека (промышленность, транспорт, среда существования, коммуникации и др.). Составной частью данной концепции являются технологии, обеспечивающие коммуникацию между устройствами – «межмашинное взаимодействие» («machine-to-machine», «M2M»).

Термин «индустрия 4.0» («industrie 4.0») был сформулирован в Германии в 2011 г. инициативной группой, объединившей крупных промышленников, экономистов и экспертов в области технологий и искусственного интеллекта. Концепция была определена как средство повышения эффективности обрабатывающей промышленности через интеграцию киберфизических систем [9] («cyber physical systems», «CPS») в заводские и фабричные процессы. Таким образом, термин «индустрия 4.0» концентрируется в сфере промышленного производства, в то время как «интернет вещей» является всеобъемлющим понятием.

Реализация концепции «индустрия 4.0» в промышленности означает внедрение киберфизических систем, в которых технологическое оборудование и оснащение, материалы и продукты, являются активными системными компонентами, самостоятельно управляющими своими технологическими и логистическими процессами. Киберфизические системы отличаются от традиционных мехатронных возможностью взаимодействия с окружающей средой, адаптации, самокорректировки и самооптимизации. Формирование массива информации осуществляется чувствительными датчиками (перемещений, давления, температуры, крутящего момента и др.). Передача информации между техническими системами может осуществляться [3] проводным (Ethernet) и беспроводным способом (WLAN). На основе полученной информации компоненты киберфизической системы выполняют определенные действия по запрограммированному алгоритму. Технологическое, контрольное, транспортное и другое оборудование находится в постоянном взаимодействии (обмен информацией) для поддержания непрерывного процесса изготовления продукции заданного количества и качества. Таким образом, внедрение концепции «индустрия 4.0» в промышленности обеспечивает резервы значительного повышения гибкости, надежности, экологичности и экономичности производственных процессов.

Необходимо рассмотреть текущее состояние вопроса реализации концепции «индустрия 4.0» в машиностроении.

На сегодняшний день накоплен опыт в области создания программных средств повышения эффективности планирования и диспетчеризации производственных процессов. Укрупненное планирование работ и формирование производственных расписаний [5] выполняется в системах класса расширенного планирования и формирования расписаний – APS (Advanced Planning & Scheduling Systems). Диспетчеризация и оперативно-календарное планирование с детализацией для конкретного подразделения предприятия (цеха, производственного участка) выполняется в системах класса MES (Manufacturing Execution Systems) – исполнительных системах производства.

Данные системы позволяют оперативно перестраивать графики для конкретного производственного подразделения предприятия в связи с изменением обстоятельств, например, поломка оборудования. Системы также имеют функции управления документами, сбора и хранения данных, управления персоналом и управления качеством продукции [4, 7].

Отечественные разработки представлены

системами «Фобос», «СПРУТ-ОКП», «YSB.Enterprise.Mes», «PolyPlan», «1C:MES», «Галактика» и др. Зарубежные разработки представлены системами «Preactor» (Англия), «Diames» (Швейцария), «JobDISPO MES», «SAP ME» (Германия) и др. MES-системы взаимодействуют со SCADA-системами (Supervisory Control And Data Acquisition) – программно-аппаратными комплексами сбора данных и диспетчерского контроля.

Данные системы предназначены для мониторинга и диспетчерского контроля удаленных объектов, сбора и архивирования сопутствующей информации. В системах SCADA обязательно наличие человека (оператора, диспетчера).

В качестве примера применения MES в области металлообработки можно рассматривать систему «Celos», выполняющую описанные выше функции для комплекса обрабатывающих центров. Система «Celos» реализована станкостроительной компанией «DMG Mori» (Германия – Япония).

Таким образом, MES-системы являются эффективными инструментами диспетчеризации работ, управления персоналом и качеством продукции и др. Применение MES-систем является неотъемлемой частью процесса эффективного управления машиностроительным производством. При этом указанные системы зависимы от объема, качества и оперативности обеспечения требуемой информацией от подразделений предприятия (цехов, производственных участков).

Для анализа производственной ситуации и принятия решений необходима оперативная и достоверная информация, например, о причинах простоя конкретной единицы технологического оборудования. Значение имеет также способ предоставления исходной информации MES-системе – объем выполняемого предприятием заказа, состав изделия, данные о персонале и оборудовании, технологическом маршруте изготовления и др. Таким образом, вопрос реализации концепции «индустрия 4.0» в машиностроении остается проблемой, требующей решений, основанных на межмашинном взаимодействии.

Направлением повышения эффективности использования металлорежущего оборудования с ЧПУ на сегодняшний день также является применение программно-аппаратных систем мониторинга работы станков – MDC (Machine Data Collection). Среди данных систем можно отметить «Foreman MDC» (Россия), «MDC-Max» (Дания) и др.

Программно-аппаратные системы нацелены на обеспечение контроля за парком станков с ЧПУ в режиме реального времени; формирование различных графиков и отчетов о

загруженности оборудования и эффективности работы персонала; выявление причин простоя оборудования и ускорение работы цеховых служб путем автоматического оповещения об аварийных ситуациях, отсутствии на станках заготовок или управляющих программ, о необходимости технического обслуживания и др.

Аппаратная часть комплексов в виде приставки монтируется на стойке ЧПУ и связывается с реле старта цикла обработки. При запуске оператором процесса обработки сигнал отправляется в центральную базу данных на сервере. В случае простоя оборудования оператор, в системе «Foreman MDC» [2] должен нажать одну из клавиш («наладка», «техническое обслуживание», «контроль детали», «нет программы», «нет заготовок», «нет задания»), или, в системе «MDC-Max» [6] – отсканировать штрих-код типовой причины. Набор типовых причин может настраиваться для конкретного предприятия. В случае если при неработающем оборудовании оператор не отправил сообщение о причине простоя, то простой воспринимается системой как необоснованный.

MDC-системы являются эффективным инструментом мониторинга производственного процесса и повышения эффективности работы металлорежущего оборудования с ЧПУ. Однако данные системы не реализуют базового принципа концепции «индустрия 4.0» – обмена данных между техническими системами (станками, транспортно-загрузочными устройствами и др.) и принятия ими решений без участия человека.

Набор отчетов и графиков, формируемых MDC-системой, предназначается для анализа руководителем производства, технологом, механиком и др. Следует отметить необходимость своевременного и грамотного извещения оператором о причине простоя оборудования в данных программно-аппаратных комплексах, что влияет на достоверность получаемых отчетов.

Таким образом, реализация концепции «индустрия 4.0» является проблемой, актуальной для современного машиностроения. Она содержит в себе резервы значительного повышения эффективности производственных процессов. Концепция должна быть реализована путем создания киберфизических систем, в которых технологическое, контрольное, транспортное и другое оборудование являются активными участниками обмена информацией между собой, и принятия решений, в т. ч. без участия человека.

В качестве ключевого показателя эффективности (КПЭ) применения данных систем может выступать, используемый в мировой

науке и практике, коэффициент общей эффективности оборудования ОЕЕ (Overall Equipment Effectiveness). Он определяется тремя вычисляемыми параметрами для технологического оборудования: доступностью, эффективностью работы и уровнем качества.

Указанные параметры, в свою очередь, зависят от шести видов потерь, связанных с работой станочного парка. Данные потери следующие: поломки оборудования; наладка и установка инструмента; работа на холостом ходу и небольшие остановы; работа на пониженных режимах резания; нарушения в технологическом процессе изготовления; сокращенные объемы выработки [4, 5].

В связи с этим решения, направленные на реализацию концепции «индустрия 4.0», должны быть ориентированы на оперативное взаимодействие технологического оборудования, например обрабатывающего центра, с окружающей производственной средой для минимизации времени простоев на наладку и ремонт, работы на заниженных режимах резания и количества брака обработанных деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вальстер, В. Индустрия 4.0 / В. Вальстер // Тенденции в автоматизации. Корпоративный журнал «Festo». – 2013. – № 1. С. 8–11.
2. Ловыгин, А. Foreman MDC – система нового поколения для мониторинга станков с ЧПУ / А. Ловыгин // CAD/CAM/CAE Observer. – 2007. – № 6. – С. 71–73.
3. Лопухов, И. Коммуникационные технологии умного предприятия в рамках концепции Индустрия 4.0 и Интернета вещей / И. Лопухов // Современные технологии автоматизации. – 2015. – № 2. – С. 36–44.
4. Медведева, Г.М. Как не допустить ошибок при выборе системы управления машиностроительным производством / Г.М. Медведева, А.Б. Мусеридзе, Е.Б. Фролов // Станочный парк. – 2012. – № 8. – С. 29–35.
5. Митин, С.Г. Автоматизация оценки производственной технологичности изделий в условиях многономенклатурных производственных систем / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв, Л.Г. Бокова // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014, № 9 (39). – С. 44–48.
6. Смирнов, А. MDC-MAX 5 – система мониторинга станков / А. Смирнов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2007. –

№ 5. – С. 76–78.

7. Соломенцев, Ю.М. Планирование в современных системах управления производством / Ю.М. Соломенцев, Р.Р. Загидуллин, Е. Б. Фролов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – № 4. – С. 77–87.

8. Эдвардссон, Я. Производство будущего – захватить инициативу / Я. Эдвардссон // Metalworking world. – 2015. – № 2. – С. 28–30.

9. Gill, H. CPS : A View from the HCSS Agencies / Talk or presentation, 21, April, 2008; St. Louis, MO. – режим доступа: https://chess.eecs.berkeley.edu/pubs/418/Gill_08_CPS_CHES_S_ViewFromHCSSAgencies.ppt.

REFERENCES

1. Valster, V. Industry 4.0 / V. Вальстер // *Trends in Automation. Corporate Journal "Festo"*. – 2013. – № 1. pp. 8–11.
2. Lovygin, A. Foreman MDC – System of new generation for NC machine monitoring / А. Ловыгин // *CAD/CAM/CAE Observer*. – 2007. – № 6. – pp. 71–73.
3. Lopukhov, I. Municipal techniques of intelligent enterprise within the limits of concept Industry 4.0 and Internet of things / I. Lopukhov // *Modern Automation Techniques*. – 2015. – № 2. – pp. 36–44.
4. Medvedeva, G.M. How to avoid errors at choosing systems of mechanical engineering management / G.M. Medvedeva, A.B. Museridze, E.B. Frolov // *Machinery*. – 2012. – № 8. – pp. 29–35.
5. Mitin, S.G. Automation of parts production manufacturability assessment under conditions multiproduct production systems / S.G. Mitin, P.Yu. Bochkaryov, L.G. Bokova // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. – 2014, № 9 (39). – pp. 44–48.
6. Smirnov, A. MDC-MAX 5 – System of machine monitoring / A. Smirnov // *CAD/CAM/CAE Observer*. – 2007. – № 5. – pp. 76–78.
7. Solomentsev, Yu.M. Planning in modern systems of production management / Yu.M. Solomentsev, R.R. Zagidullin, E. B. Frolov // *Information Technologies and Computer Systems*. – 2010. – № 4. – pp. 77–87.
8. Edwardsson, Ya. Future production – to capture initiative / Ya. Edwardsson // *Metalworking world*. – 2015. – № 2. – С. 28–30.
9. Gill, H. CPS : A View from the HCSS Agencies / Talk or presentation, 21, April, 2008; St. Louis, MO. – access mode : https://chess.eecs.berkeley.edu/pubs/418/Gill_08_CPS_CHES_S_ViewFromHCSSAgencies.ppt.

Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарёв

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

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

<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. Дюбова.

Сдано в набор 05.05.2016. Подписано в печать 26.06.2016.

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