

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 7 (73)

2017

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)

акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

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

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

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

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

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

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

д.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. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

Зам. главного редактора

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

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

Тел. редакции: 8-903-592-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Кузьмин С.В., Лысак В.И., Кузьмин Е.В. Применение ультразвука при сварке взрывом 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Инновационные технологические процессы с использованием ультразвука . 11
Смоленцев В.П. Инновационные технологии комбинированных методов обработки 15

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Безъязычный В.Ф., Басков М.В. Расчётное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей 20

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И МОДУЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Суслов А.Г. Конструкторско-технологическое обеспечение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения 25
Базров Б.М. Анализ классификаций изделий машиностроения 29
Макаров В.Ф. Разработка и применение новых инновационных технологий при производстве современных газотурбинных двигателей 33

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Витязь П.А., Хейфец М.Л., Чижик С.А. Состояние и перспективы развития технологического комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов. 42

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 (73)

2017

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

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

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)

Acad. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

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

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

Registration certificate
ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN BLANK PRODUCTION

Kuzmin S.V., Lysak V.I., Kuzmin E.V. Ultrasound application when explosion welding 3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S.
Innovation Technological processes with ultrasound use 11
Smolentsev V.P. Peculiarities in easy spur cog-wheel shaving 15

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Beziyazychny V.F., Baskov M.V. Rated definition of degree of cutter coating influence upon parameters of surface layer quality of parts worked 20

FUNCTION-ORIENTED AND MODULAR TECHNOLOGIES

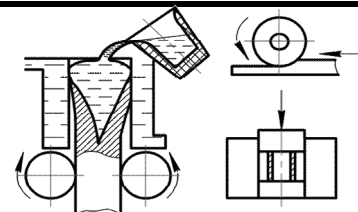
Syslov A.G. Design-technological support of quality and competitive ability of engineering products 25
Bazrov B.M. Analysis and classification of engineering parts 29
Makarov V.F. Development and application of new innovation technologies in manufacturing modern gas turbine engine. 33

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Vityaz P.A., Heifets M.L., Chizhik S.A. State and outlooks in development of technological complex of additive manufacturing composite parts 42

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 621.791.13
DOI: 10.12737/article_595256f165bf11.96830007

С.В. Кузьмин, д.т.н.,
В.И. Лысак, академик РАН,
Е.В. Кузьмин, к.т.н.
(ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28)
E-mail: weld@vstu.ru

Применение ультразвука при сварке взрывом*

Рассмотрен комбинированный процесс сварки металлов взрывом с одновременным воздействием ультразвука на свариваемые металлы. Показаны основные закономерности формирования соединения металлов при сварке взрывом с одновременным воздействием ультразвуковых колебаний, и установлены взаимосвязи между параметрами исследуемого комбинированного процесса и свойствами полученных соединений.

Ключевые слова: сварка взрывом; ультразвуковая обработка; композиционный материал; пластическая деформация; область свариваемости.

S.V. Kuzmin, D. Eng.,
V.I. Lysak, Academician of the RAS,
E.V. Kuzmin, Can. Eng.
(FSBEI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia, 400005)

Ultrasound application when explosion welding

A combined process of metal welding by means of an explosion with simultaneous an ultrasound impact upon metal pieces to be welded is considered. Basic regularities in the formation of metal joints during explosion welding with a simultaneous impact of ultrasonic oscillations are shown, and interconnections between parameters of the combined process under investigations and the properties of joints obtained are defined.

Keywords: explosion welding; ultrasonic machining; composite; plastic deformation; weldability area.

Воздействие несколькими видами энергии или совмещение различных способов ее подвода является одним из путей повышения технологичности изготовления конструкционных материалов и представляет значительный научный и практический интерес, напрямую связанный с разработкой и внедрением качественно новых технологий, что, в свою очередь, представляется актуальным.

При сварке взрывом образование соедине-

*Работа частично выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках «Совета по грантам Президента РФ» (СП-1940.2016.1) и гранта РФФИ № 15-08-09438.

ния происходит в результате деформационного воздействия на соединяемые материалы, которое характеризуется высокой скоростью их соударения при малой длительности контактного взаимодействия ($\sim 10^{-6}$ с). Процессы диффузии за такое короткое время не успевают произойти. Поэтому этот способ нашел широкое применение при производстве металлических слоистых композиционных материалов из разнородных материалов, соединить которые традиционными методами сварки затруднительно, либо невозможно. Полученные сваркой взрывом композиционные материалы обладают высокой прочностью соединения слоев и эффек-

тивно применяются в различных отраслях промышленности [1 – 3].

Вместе с тем, к негативным явлениям данного способа следует отнести образование в зоне соединения оплавленного металла и других неоднородностей, снижающих прочность и эксплуатационные свойства сваренного композита. Создание биметаллических и многослойных композитов из металлов с резко отличающимися физико-механическими свойствами имеет ряд сложностей, связанных не только с весьма узким диапазоном свариваемости, но и образованием в зоне соединения значительных термических напряжений и ряда интерметаллидных фаз.

Уменьшение вероятности образования нежелательных структур возможно за счет использования низкоскоростных взрывчатых веществ (ВВ), однако, промышленный выпуск ВВ с такими характеристиками не освоен.

Расширить диапазон свариваемости металлов с неудовлетворительной металлургической совместимостью позволяют несколько технологических методов: введение промежуточного слоя, обладающего хорошей свариваемостью с металлами, а также предварительное воздействие на металл термическим или иным способом, приводящее к изменению его физико-механических свойств [1 – 4].

Многочисленными исследованиями показано, что воздействие на металл (как в жидкой, так и твердой фазах) ультразвуковыми (УЗ) колебаниями приводит к ряду положительных явлений, улучшающих процесс их обработки, в том числе и при сварке [5 – 8].

Несмотря на значительные успехи в области высокоскоростного соударения тел и ультразвуковой обработки материалов, исследований по изучению процесса деформирования металла и формирования сварного соединения в условиях взрывного нагружения и воздействия УЗ колебаний практически не проводилось. Поэтому повышение качества и расширение области свариваемости металлов взрывом за счет ввода дополнительной энергии источника УЗ колебаний представляется актуальной.

Целью данной работы является обобщение результатов исследований структуры и свойств соединений однородных и разнородных пар металлов при их сварке взрывом с одновременным воздействием ультразвука.

Первые результаты проведенных опытов процесса сварки взрывом с одновременным воздействием УЗ колебаний произвели феноменологическое впечатление, оставив множество вопросов и предположений, требующих

объяснения. Так, впервые был обнаружен эффект изменения структуры и свойств сварных соединений, проявляющийся в увеличении прочности соединения, микротвердости и существенном уменьшении параметров волн и количества оплавленного металла в околошовной зоне по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука.

Для детального понимания исследуемого процесса необходимо было выявить закономерности формирования соединения металлов при сварке взрывом с одновременным воздействием УЗ колебаний, и установить взаимосвязи между параметрами исследуемого комбинированного процесса и свойствами полученных соединений.

На первом этапе исследовалось совместное влияние схемы распространения УЗ колебаний и параметров взрывного нагружения на структуру и свойства полученных сварных соединений. Для этого сварку взрывом с одновременным воздействием ультразвука на неподвижную пластину производили по двум схемам: встречно-направленным и перпендикулярно-направленным распространением продольных УЗ колебаний относительно направления процесса сварки. Для сравнения результатов исследования одновременно производили сварку взрывом контрольных образцов (таких же пар металлов) на идентичных режимах взрывного нагружения, но без воздействия ультразвука [9].

Максимальный эффект от воздействия ультразвука наблюдается при его встречно-направленном приложении относительно направления процесса сварки взрывом. Также следует отметить, что при сварке взрывом модельных медных образцов воздействие ультразвуковых колебаний принципиально меняет волновой профиль зоны соединения, форму и структуру оплавленных участков. На границе соединения образуются волны неправильной формы с тонкой прерывающейся прослойкой оплавленного металла, вытянутой вдоль линии соединения, в то время как контрольные образцы без применения ультразвука имеют четко выраженный синусоидальный профиль волны с трапецеидальной формой оплава, вокруг центра кристаллизации которого расположены игольчатые дендриты [9].

В дальнейших исследованиях при идентичных условиях взрывного нагружения применялась усовершенствованная схема сварки взрывом с одновременной ультразвуковой обработкой одной из свариваемых неподвижных пластин, которая позволяла одной метаемой пла-

стиной одновременно сваривать два неподвижных образца, один из которых являлся исследуемым (с воздействием УЗ колебаний), второй – контрольным (без применения ультразвука) [9 – 11].

Для понимания в какой момент времени происходит указанный выше эффект от воздействия ультразвука, проводился рентгеноструктурный анализ четырех групп образцов из меди М1: в состоянии после отжига; после отжига и обработки ультразвуком; после отжига и сварки взрывом; сваренные взрывом образцы в состоянии после отжига с предварительной и одновременной УЗ обработкой [11].

Результаты опытов подтвердили предположение, что предварительная ультразвуковая обработка образцов с последующей их сваркой взрывом не влияет на структуру и свойства околошовной зоны, а ключевую роль на формирование сварного соединения оказывает именно одновременное воздействие УЗ колебаний и ударных волн в процессе сварки взрывом.

Одновременная ультразвуковая обработка при сварке взрывом изменяет свойства меди на уровне кристаллической решетки, которое выражается в уменьшении размера кристаллитов более чем 3–4 раза, увеличении микродеформаций и напряжений второго рода по сравнению с образцами, полученными без применения ультразвука. Увеличение времени предварительного воздействия с 10 до 60 с на металл высокочастотных акустических волн приводит к снижению напряжений второго рода [11].

Сравнительный анализ степени влияния мощности и времени предварительного воздействия высокочастотных акустических волн на изменение параметров зоны соединения при сварке взрывом под воздействием ультразвука показал, что дискретный рост мощности на порядок (с 0,2 до 2,0 кВт) приводит к уменьшению длины и амплитуды волны зоны соединения не более, чем на 15...20 %, в то время как увеличение продолжительности предварительного воздействия снижает указанные параметры волны в 2,5 ... 3 раза.

Следующим этапом стало исследование влияния кинематических параметров сварки взрывом и ультразвуковой обработки на структуру и свойства полученных соединений.

Так, при исследовании влияния скорости соударения на прочность на отрыв слоев соединений медных пластин видно, что во всем диапазоне изменения v_c от 260 до 440 м/с после сварки взрывом с воздействием УЗ наблюдается увеличение прочности по сравнению с кон-

трольными образцами без воздействия ультразвука. Причем наибольшая разница в значениях прочности соединения отмечается на режимах, близких к нижней границе сварки взрывом, что может свидетельствовать об изменении области свариваемости (в данном случае – нижней границы). Схожая тенденция наблюдалась как в стальных, так и в алюминиевых образцах [12].

Из общих результатов многочисленных исследований [7 – 9 и др.] можно сделать вывод, что при воздействии ультразвуком одними из основных регулируемых параметров процесса, определяющими, в конечном счете, свойства обрабатываемых и свариваемых материалов, являются частота и амплитуда УЗ колебаний. Поэтому дальнейшие опыты были направлены на исследование влияния данных параметров, причем в первой серии экспериментов изменяли только частоту УЗ колебаний в диапазоне 16... 25 кГц, остальные параметры сварки взрывом и УЗ воздействия оставались постоянными, а затем – только амплитуду УЗ колебаний в диапазоне 7... 25 мкм [12].

Исследование влияния частоты УЗ колебаний на механические свойства сваренных взрывом соединений показало, что с их увеличением сначала наблюдается рост прочности на отрыв слоев, достигая максимального значения: для медных образцов $\sigma_{отр} = 278$ МПа при $f = 18$ кГц (рис. 1, а); для алюминиевых образцов $\sigma_{отр} = 115$ МПа при $f = 20$ кГц (рис. 1, б). Дальнейшее повышение частоты УЗ колебаний приводит к снижению прочности, по-видимому, за счет увеличения объема оплавленного металла в зоне соединения (рис. 2).

При этом максимальные значения прочности соединения М1+М1 достигаются в достаточно широком диапазоне частот 16...20 кГц (см. рис 1, а). При сварке взрывом алюминиевых образцов А5+А5 наблюдается более узкий диапазон значений «оптимальной» частоты $f = 20...22$ кГц со смещением в область больших значений (см. рис. 1, б).

Установлено, что с увеличением частоты УЗ колебаний во всем диапазоне изменения f (14...25 кГц) наблюдается увеличение параметров волн и объема оплавленного металла на границе соединения (см. рис. 1, 2).

Результаты опытов по исследованию влияния амплитуды УЗ колебаний на свойства сваренных взрывом соединений показали, что изменение амплитуды в диапазоне 7... 25 мкм при постоянной частоте не оказывает существенного влияния на прочность и структуру полученных медных и алюминиевых соединений

по сравнению с изменением частоты.

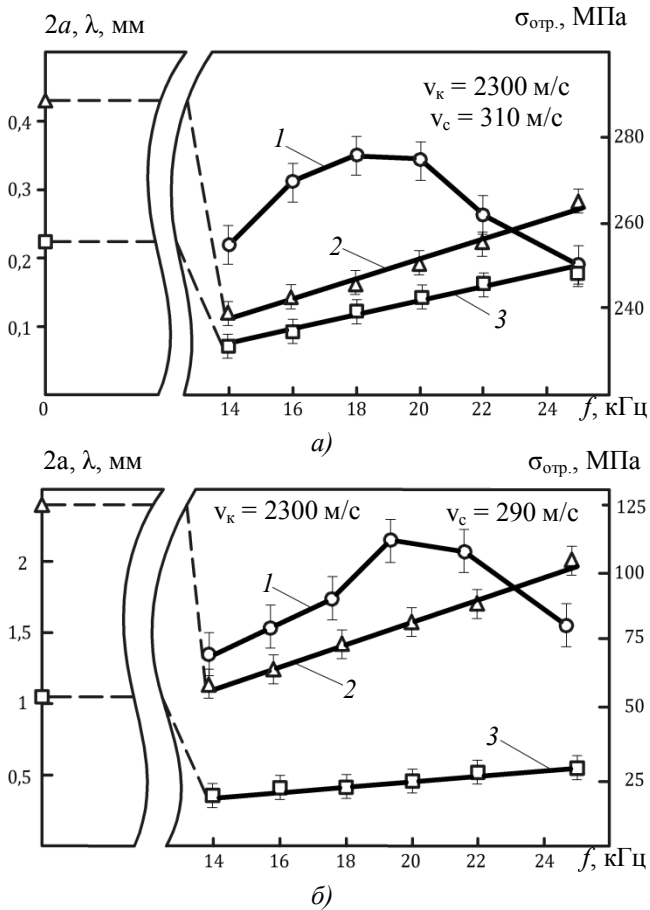


Рис. 1. Влияние частоты f УЗ колебаний на прочность $\sigma_{отр}$ и параметры волн ($2a, \lambda$) сваренного взрывом: *a* – соединение М1+М1; *б* – соединение А5+А5; *1* – прочность на отрыв слоев $\sigma_{отр}$; *2* – длина волны λ ; *3* – размах волны $2a$

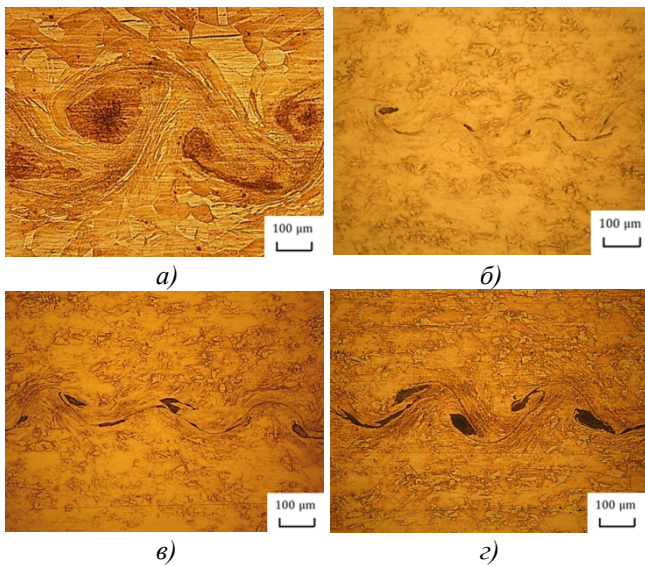


Рис. 2. Микроструктура границы соединения М1+М1: *a* – сварка взрывом без воздействия УЗ колебаний; *б* – *с* – сварка взрывом с воздействием УЗ колебаний частотой 18 кГц, 22 кГц и 25 кГц, соответственно

Так, при увеличении амплитуды ξ более чем в три раза наблюдается незначительное уменьшение прочности соединения и небольшой рост количества оплавленного металла: для медных образцов величина $\sigma_{отр}$ уменьшилась с 276 до 258 МПа, а величина $K_{опл}$ возросла с 23 до 27 %; для алюминиевых образцов величина $\sigma_{отр}$ уменьшилась с 115 до 103 МПа, а величина $K_{опл}$ возросла с 9 до 15 % (рис. 3) [13].

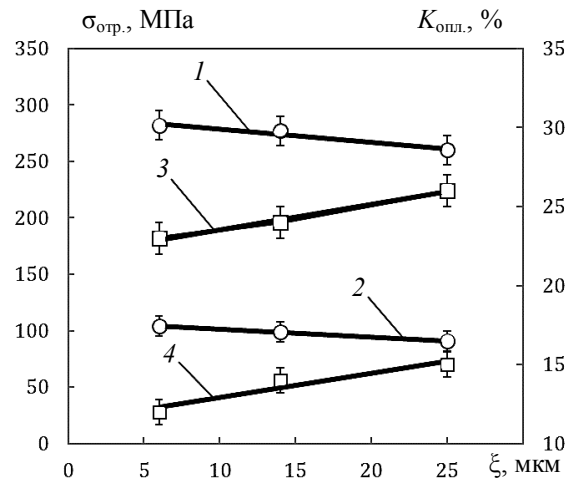


Рис. 3. Влияние амплитуды ξ УЗ колебаний на прочность $\sigma_{соед}$ и количество оплавок $K_{опл}$ сваренных взрывом медных и алюминиевых соединений: *1* – $\sigma_{отр}$ М1+М1; *2* – $\sigma_{отр}$ А5+А5; *3* – $K_{опл}$ М1+М1; *4* – $K_{опл}$ А5+А5

Полученные результаты указывают на изменение условий пластического течения металла в окрестностях точки соударения, что может быть вызвано изменением свойств металла, находящегося под воздействием ультразвука. Для детального изучения данного процесса необходимо было исследовать характер пластического деформирования металла околошовной зоны (ОШЗ) при сварке взрывом однородных модельных алюминиевых и медных пластин под воздействием УЗ колебаний.

Сварку взрывом при одновременном воздействии ультразвука на неподвижную пластину осуществляли на режимах, при которых образуется синусоидальный профиль зоны соединения. Для сравнения полученных результатов одновременно производили сварку взрывом тех же пар металлов на идентичных режимах (v_c, v_k, W_2) без воздействия ультразвука.

Условия опытов выдерживались такими, чтобы в каждом из них параметры процесса (в том числе, единичная масса) были строго оди-

наковыми независимо от схемы сварки, что достигалось соответствующим расчетом высоты заряда взрывчатого вещества и установочного зазора. Переменным параметром являлось наличие или отсутствие ультразвукового воздействия. Такое построение условий опытов позволило детально проследить характер и особенности пластического течения металла (ОШЗ) сваренных взрывом однородных материалов и выявить параметры процесса, оказывающие наибольшее влияние на деформационные процессы.

Исследование пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом однородных модельных алюминиевых и медных пластин под воздействием ультразвука позволило выявить следующие особенности.

При сварке взрывом с одновременным ультразвуковым воздействием максимальная остаточная сдвиговая деформация g_{max} , измеренная в непосредственной близости от условной линии соединения слоев, составляет около 155 %, в то время как в контрольном образце, полученном на идентичных режимах сварки взрывом, но без воздействия ультразвука, сдвиговая деформация меньше и составляет $g_{max} \sim 130$ %. По мере удаления от линии соединения значения g_{max} интенсивно уменьшаются, но с разным градиентом (рис. 4, а).

Аналогичное распределение остаточной сдвиговой деформации g_{max} наблюдается и для случая сварки алюминиевых модельных пластин (рис. 4, б). Так, при сварке взрывом с воздействием ультразвука максимальная остаточная сдвиговая деформация g_{max} , измеренная в непосредственной близости от условной линии соединения (ЛС), для алюминиевых образцов составляет около 175 %, в то время как в контрольном образце без воздействия ультразвука значения $g_{max} \sim 155$ %.

Анализ эпюр g_{max} и микроструктуры медных и алюминиевых образцов показывает, что при формировании соединения под воздействием ультразвука, несмотря на уменьшение параметров границы раздела слоев, в пластическое течение вовлекается больший объем металла ОШЗ по сравнению с образцами без ультразвукового воздействия. Наряду с увеличением максимальных значений g_{max} , в пластическую деформацию вовлекаются более глубоко расположенные слои (см. рис. 4). При этом стоит отметить, что значения остаточной сдвиговой деформации g_{max} , измеренные на одинаковом расстоянии от условной линии соединения, различны для образцов с воздействием и без

воздействия ультразвука.

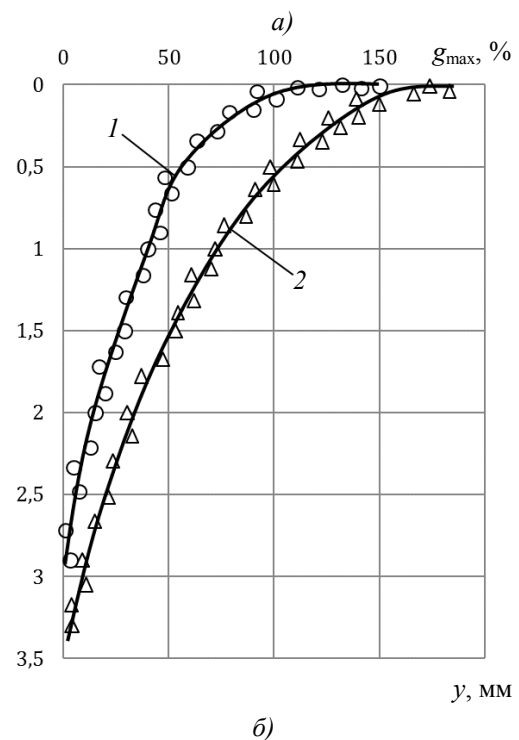
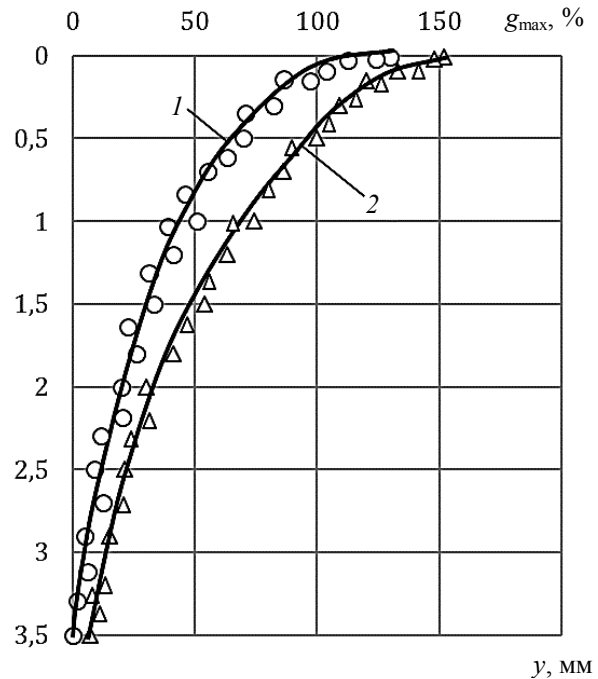


Рис. 4. Эпюры максимальных сдвигов g_{max} в околошовной зоне соединения М1+М1 (а) и соединения А5+А5 (б) в контрольном образце без подключения ультразвука (1) и образце с воздействием ультразвука (2)

Выявленная закономерность пластического течения металла ОШЗ в процессе образования соединения при сварке взрывом под воздействием ультразвука, очевидно, связана с изменением механических свойств поверхностных слоев металла, в котором генерируются высо-

кочастотные волны непосредственно перед соударением пластин.

При воздействии на металл ультразвуковых колебаний в нем реализуется акустопластический эффект, заключающийся в снижении предела текучести материала при постоянной скорости деформации, что дает возможность дислокациям и вакансиям с меньшими энергетическими затратами преодолевать барьеры, перемещаться и взаимодействовать друг с другом. В свою очередь, это ведет к изменению пластических свойств поверхностных слоев металла и условий формирования соединения соударяемых пластин [12].

Анализ результатов проведенных исследований на однородных материалах (алюминий, медь) показал, что сварка взрывом с применением ультразвука позволяет повысить прочность на границе соединения, особенно на режимах, близких к нижней границе сварки взрывом, что особенно актуально для композиций из металлов с резко-отличающимися физико-механическими свойствами. С этой целью исследовалась область сварки взрывом, структура и свойства медно-алюминиевых композитов, получаемых сваркой взрывом с воздействием ультразвука.

Чтобы полностью охватить основные характерные области сварки взрывом пары алюминий-медь [1, 2] скорость точки контакта v_k варьировалась в диапазоне 600...3500 м/с, за счет применения смесевых взрывчатых веществ (аммонит 6ЖВ + кварцевый песок), динамический угол соударения изменялся от 4° до 18° (скорость соударения v_c от 140 до 530 м/с), что, в свою очередь, позволило получить значения энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию, W_2 , в диапазоне 0,07...1,0 МДж/м².

Установлено, что при сварке взрывом меди с алюминием под воздействием ультразвука наблюдается существенное уменьшение количества оплавленного металла во всем диапазоне свариваемости, принципиально меняется и форма участков оплавленного металла, граница соединения имеет более прямолинейный профиль, в сравнении с образцами, полученными сваркой взрывом без воздействия ультразвука [14].

Одновременное воздействие ультразвука при сварке взрывом позволяет повысить качество соединений, расширить область свариваемости пары медь-алюминий, как вблизи нижней границы, так и вблизи верхней (рис. 5) и обосновано подойти к оптимизации режимов взрывного нагружения, обеспечивающих полу-

чение высокопрочных соединений с минимальным развитием структурной и механической неоднородностей.

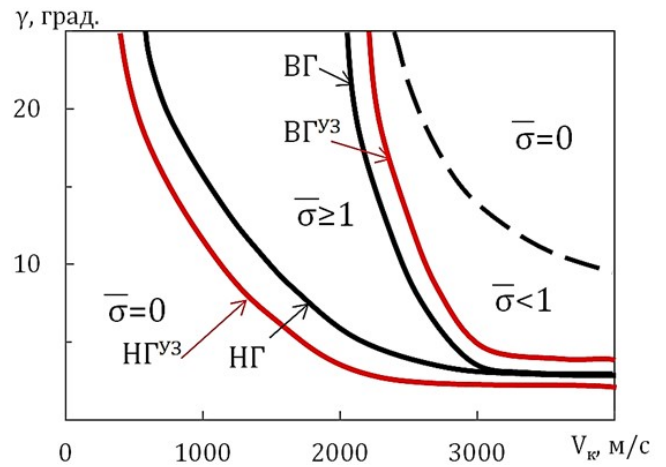


Рис. 5. Влияние воздействия ультразвука на область сварки взрывом соединения М1+А5:

ВГ – верхняя граница; НГ – нижняя граница; УЗ – сварка взрывом с воздействием ультразвука

В работе [15] исследовалось воздействие ультразвука на термический цикл в сварном шве в процессе его формирования при сварке константановой и медной пластин невозмущающим термопарным методом измерения температуры на границе соединения. Из сравнения температурных циклов в шве и параметров волн при сварке взрывом медных пластин с константановыми в условиях воздействия ультразвука и без его воздействия, разницы, превосходящей погрешности измерений, не наблюдается (рис. 6, 7). Это может объясняться тем, что степень влияния ультразвука на процессы, происходящие при сварке металлов взрывом, зависит как от материалов свариваемых пар, так и от режима соударения.

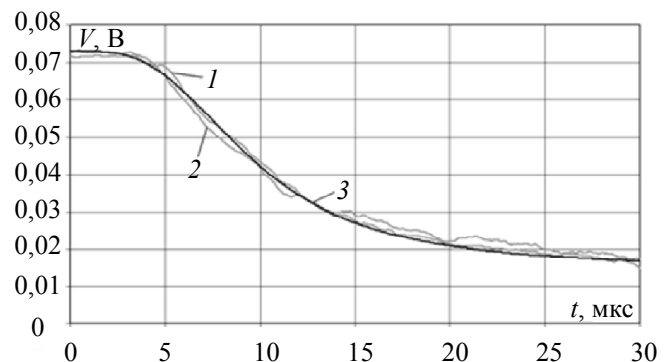


Рис. 6. Зависимость напряжения от времени на естественной термопаре:

1, 2 – экспериментально определенные напряжения при воздействии и без воздействия ультразвука соответственно; 3 – расчетная зависимость напряжения от времени $V_\phi(t)$

В данной работе измерения проводились при параметрах соударения пластин, обеспечивающих развитие волнообразование с расплавами на границе соединения металлов. По-видимому, процесс деформации металлов в зоне соединения наиболее чувствителен к ультразвуковому воздействию в условиях пограничного режима соударения с волнообразованием и без волнообразования.

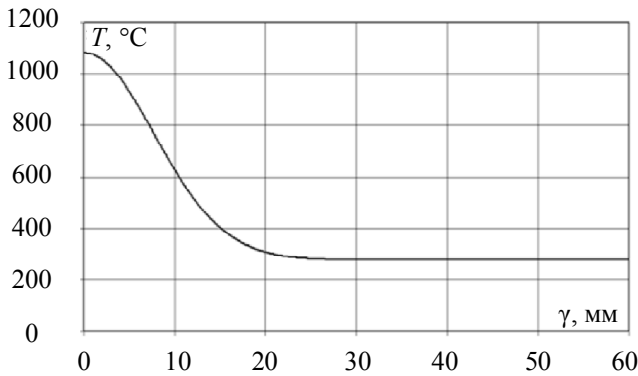


Рис. 7. Распределение температуры в шве в процессе сварки взрывом

Результаты проведенных исследований показывают целесообразность применения ультразвука в ходе взрывного нагружения, выражающуюся в повышении качества получаемых соединений и расширения области свариваемости соединяемых металлов. Тем не менее, данный комбинированный процесс еще не до конца изучен, поэтому исследования в этом направлении будут продолжены.

ВЫВОДЫ

1. Впервые обнаружен эффект изменения структуры и свойств сварных соединений в условиях сварки взрывом с одновременным воздействием УЗ колебаний, проявляющийся в увеличении прочности, микротвердости и существенном уменьшении параметров волн, количества оплавленного металла по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука.

2. Экспериментально доказано, что предварительная ультразвуковая обработка образцов с последующей их сваркой взрывом не влияет на структуру и свойства околошовной зоны, а ключевую роль на формирование сварного соединения оказывает именно одновременное воздействие УЗ колебаний и ударных волн в процессе сварки взрывом.

3. Показано, что наибольшее влияние на изменение структуры и свойств свариваемых

взрывом соединений оказывает частота УЗ колебаний, при этом максимальные значения прочности слоев на отрыв для медных образцов реализуются в диапазоне частот $f = 17 \dots 20$ кГц, а для алюминиевых образцов наблюдается смещение в сторону больших значений частот $f = 20 \dots 22$ кГц.

4. Установлено, что пластическое течение металла околошовной зоны в условиях сварки взрывом с воздействием УЗ колебаний характеризуется меньшим градиентом эпюр остаточных сдвиговых деформаций и большей глубиной деформированного слоя по сравнению со сваркой взрывом без применения ультразвука.

5. Одновременное воздействие ультразвука при сварке взрывом позволяет повысить качество соединений, расширить область свариваемости металлов и обосновано подойти к оптимизации режимов взрывного нагружения, обеспечивающих получение высокопрочных соединений с минимальным развитием структурной и механической неоднородностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лысак, В.И., Кузьмин, С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение -1, 2005. – 544 с.
2. Оголихин, В.М., Яковлев, И.В. Сварка взрывом в электрометаллургии. – Новосибирск: СО РАН, 2009. – 160 с.
3. Конон, Ю.А., Первухин, Л.Б., Чудновский, А.Д. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
4. Бондарь, М.П., Псахье, С.Г., Дмитриев, А.И., Никонов, А.Ю. Об условиях локализации деформации и фрагментации микроструктуры при высокоскоростном нагружении // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т.16. №3. – С.5–13.
5. Takehiko Watanabe, Hideo Sakuyama, Atsushi Yanagisawa. Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet // Journal of Materials Processing Technology, 2009. Vol. 209. Pp. 5475–5480.
6. Балдев, Р., Раджендран, В., Паланичами, П. Применение ультразвука. – М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
7. Абрамов, О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. – М.: Наука, 2000. – 297 с.
8. Тяпунина, Н.А., Бушуева, Г.В., Силис, М.И., Подсобляев, Д.С., Лихущин, Ю.Б., Богуненко, В.Ю. Поперечное скольжение дислокаций в ультразвуковом поле и влияние на этот процесс амплитуды и частоты ультразвука, ориентации образца и коэффициента динамической вязкости // Физика твердого тела. – 2003. – Т.45. №5. – С.836–841.
9. Кузьмин, Е.В., Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Дородников, А.Н. Влияние схемы распространения ультразвуковых колебаний на структуру и свойства свариваемых

рых взрывом соединений // Сварка и диагностика. – 2016. – №3. – С. 53–57.

10. Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Кузьмин, Е.В., Дородников А.Н. Формирование структуры и свойств свариваемых взрывом соединений под воздействием ультразвука // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116, № 8. – С. 837–843.

11. Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Кузьмин, Е.В. Исследование влияния ультразвука на тонкую структуру и свойства меди при сварке взрывом // Известия ВолгГТУ. – 2013. – № 18 (121). – С. 24–28.

12. Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Кузьмин, Е.В., Дородников, А.Н. Влияние параметров высокочастотной акустической волны на структуру, свойства и пластическое течение металла зоны соединения свариваемых взрывом материалов с одновременным воздействием ультразвука // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118. – № 5. – С. 513–521.

13. Кузьмин, Е.В., Пеев, А.П., Лысак, В.И., Кузьмин, С.В., Дородников, А.Н. О влиянии параметров ультразвуковой обработки на структуру и свойства алюминиевых соединений при сварке взрывом // Известия ВолгГТУ. – 2014. Вып.7. № 20. – С. 21–24.

14. Кузьмин, Е.В., Пеев, А.П., Кузьмин, С.В., Лысак, В.И., Дородников, А.Н., Сорокин А.Е., Никулин Е.А. Особенности формирования медно-алюминиевых соединений при сварке взрывом с воздействием ультразвука // Известия ВолгГТУ. – 2015. – № 10 (170). – С. 70–78.

15. Пай, В.В., Гулевич, М.А., Яковлев, И.В., Пеев, А.П., Лысак, В.И., Кузьмин, С.В., Кузьмин, Е.В., Дородников, А.Н. Измерение температуры в шве при сварке металлов взрывом под действием ультразвука // Известия ВолгГТУ. – 2016. – № 10 (189). – С. 5–10.

REFERENCES

1. Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. *Explosion Welding*. – М.: Mechanical Engineering -1, 2005. – pp. 544.

2. Ogolikhin, V.M., Yakovlev, I.V. *Explosion Welding in Electrometallurgy*. – Novosibirsk: SS of the RAS, 2009. – pp. 160.

3. Konon, Yu.A., Pervukhin, L.B., Chudnovsky, A.D. *Explosion Welding*. – М: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 216.

4. Bondar, M.P., Psakhiye, S.G., Dmitriev, A.I., Nikonov, A.Yu. *On Conditions of Deformation Localization and Microstructure Fragmentation at High-speed Loading* // Physical Meso-mechanics. – 2013. – Vol.16. №3. – pp.5–13.

5. Takehiko Watanabe, Hideo Sakuyama, Atsushi Yanagi

sawa. Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet // Journal of Materials Processing Technology, 2009. Vol. 209. Pp. 5475–5480.

6. Baldev, R., Ragendran, V., Palanichamy, P. *Ultrasound Application*. – М.: Technosphere, 2006. – pp. 576.

7. Abramov, O.V. *Strong Ultrasound Impact upon Liquid and Solid Metals*. – М.: Science, 2000. – pp. 297.

8. Tyapunina, N.A., Bushueva, G.V., Silis, M.I., Podsoblyayev, D.S., Likhushin, Yu.B., Bogunenkov, V.Yu. Dislocations cross slip in ultrasonic field and impact of ultrasound amplitude and frequency, sample orientation and dynamic viscosity factor upon this process // *Solid-State Physics*. – 2003. – Vol.45. №5. – pp.836–841.

9. Kuzmin, E.V., Peyeв, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Dorodnikov, A.N. Impact of ultrasonic oscillations propagation procedure upon structure and properties of joints welded by explosion // *Welding and Diagnostics*. – 2016. – №3. – pp. 53–57.

10. Peyeв, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Kuzmin, E.V., Dorodnikov, A.N. Formation of structure and properties of joints welded by explosion under impact of ultrasound // *Metal Physics and Metal Science*. – 2015. – Vol. 116, № 8. – pp. 837–843.

11. Peyeв, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Kuzmin, E.V. Investigation of ultrasound impact upon thin structure and copper properties during explosion welding // *Proceedings of VolgaSTU*. – 2013. – № 18 (121). – pp. 24–28.

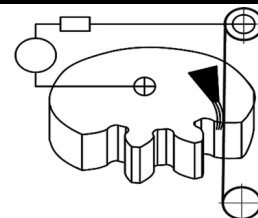
12. Peyeв, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Kuzmin, E.V., Dorodnikov, A.N. Impact of high-frequency acoustic wave upon structure, properties and plastic flow of metal in area of material joint welded with explosion with simultaneous ultrasound impact // *Physics of Metals and Metal Science*. – 2017. – Vol. 118. – № 5. – pp. 513–521.

13. Kuzmin, E.V., Peyeв, A.P., Lysak, V.I., Kuzmin, S.V., Dorodnikov, A.N. On impact of ultrasonic machining parameters upon structure and properties of aluminum joints during welding with explosion // *Proceedings of VolgaSTU*. – 2014. Edition7. № 20. – pp. 21–24.

14. Kuzmin, E.V., Peyeв, A.P., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Dorodnikov, A.N., Sorokin, A.E., Nikulin E.A. Peculiarities of copper-aluminum joints formation during explosion welding with ultrasound impact // *Proceedings of VolgaSTU* – 2015. – № 10 (170). – pp. 70–78.

15. Pai, V.V., Gulevich, M.A., Yakovlev, I.V., Peyeв, A.P., Lysak, V.I., Kuzmin, S.V., Kuzmin, E.V., Dorodnikov, A.N. Temperature measurement in joint during metal explosion welding under ultrasound impact // *Proceedings of VolgaSTU*. – 2016. – № 10 (189). – С. 5–10.

Рецензент д.т.н. Д.И. Фатюхин



УДК 534-8

DOI: 10.12737/article_595256f17e2639.96924821

В.М. Приходько, чл.-кор. РАН,
Р.И. Нигметзянов, к.т.н.,
С.К. Сундуков, к.т.н.,
Д.С. Фатюхин, д.т.н.
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64)
E-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

Инновационные технологические процессы с использованием ультразвука

Рассмотрены основные направления применения ультразвуковых технологий в машиностроении. Приведены результаты исследований по влиянию ультразвуковой обработки на свойства различных сред. Предложены пути управления технологическими процессами с использованием ультразвука.

Ключевые слова: ультразвуковая технология; машиностроение; обработка материалов; поверхностное деформирование; акустические потоки; кавитация.

V.M. Prikhodko, Corr-M. of the RAS,
R.I. Nigmatzyanov, Can.Eng.,
S.K. Sundukov, Can. Eng.,
D.S. Fatyukhin, D. Eng.

(Moscow Motor Vehicle-Road State Technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow 125319)

Innovation technological processes with ultrasound use

Basic directions in the application of ultrasonic technologies in mechanical engineering are considered. The results of investigations on the ultrasonic machining impact upon properties of various media are shown. The ways of technological process control with the use of ultrasound are offered.

Keywords: ultrasonic technology; mechanical engineering; material machining; surface deformation; acoustic flows; cavitation.

Воздействие ультразвука на твердые, жидкие и газообразные среды отличается по своей физической природе, и обусловило широкое применение высокочастотных колебаний в медицине, в пищевой промышленности, в информационной и измерительной технике, в машиностроении. Основными характеристиками ультразвукового воздействия на различные среды являются частота колебаний, их амплитуда и излучаемая мощность.

При повышении частоты колебаний источника ультразвука снижается его амплитуда и

излучаемая мощность. Верхние границы ультразвукового частотного диапазона (1,5 ... 2,0 мГц) используются для процессов, предполагающих минимальное воздействие на объект обработки, например, для различного рода измерений, диагностики и дефектоскопии. Получение ощутимых технологических воздействий на свойства жидкостей и твердых тел осуществляется при наложении колебаний с частотами 8...40 кГц и удельной мощностью до 50 Вт/см² и выше.

Использование различных технологических

приёмов, таких как перемещение излучателей, изменение их геометрии и формы, регулирование газонасыщения жидкой среды и др. существенно расширяют технологические возможности ультразвука, позволяют управлять основными эффектами, возникающими при воздействии ультразвука на твёрдые, жидкие и газообразные среды.

Управление процессами обработки твердых тел

При передаче высокочастотных колебаний твердым телам создаётся ряд эффектов, широко используемых в процессах резания, поверхностного пластического деформирования, сварки, сборки и разборки соединений деталей.

В основе практического применения ультразвука для обработки твердых тел лежат действия знакопеременных динамических напряжений и поглощение акустической энергии дефектами кристаллического строения деформируемого материала.

Ультразвуковая размерная обработка получила распространение для прошивки сквозных и глухих отверстий, раскроя и контурной резки твердых и хрупких материалов – керамики, кварца, рубина, алмаза, стекла, твердых сплавов.

Ультразвуковая обработка представляет собой процесс механического разрушения, производимого частичками абразива, лежащими на обрабатываемой поверхности заготовки, в результате удара по ним инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой (8...40 кГц) и прижимаемого к поверхности с заданной силой F .

Разрушение носит характер микровыкола, поэтому эффективно поддаются этому способу обработки только хрупкие материалы. При оптимальных условиях наибольшая скорость съема достигается при обработке стекла и составляет 6000...9000 мм³/мин, при обработке твердого сплава – около 100...150 мм³/мин [1].

Величина получаемой шероховатости в основном определяется зернистостью применяемого абразива и свойствами обрабатываемого материала. Опыт показывает, что чем лучше обрабатывается материал, тем больше шероховатость поверхности. При обработке стекла $Ra = 5...2,5$ мкм, для твердого сплава $Ra = 0,63...0,32$ мкм [2].

Кроме непосредственно ультразвуковой размерной обработки высокочастотные колебания применяются для повышения эффек-

тивности процессов резания лезвийными и абразивными инструментами.

Качество поверхностей деталей, обработанных резанием, напрямую зависит от деформации материала в зоне обработки.

Исследования показали, что основным эффектом применения ультразвука при точении и фрезеровании является уменьшение силы резания и улучшение качества поверхности. Возбуждение ультразвуковых колебаний режущего инструмента приводит к увеличению угла сдвига стружки, изменению её характера – элементная и суставчатая превращается в сливную. Следствием изменения деформаций материала в зоне резания является уменьшение высотных параметров шероховатости в 1,5 – 2 раза [1].

В случае обработки осевыми инструментами появляется возможность повысить скорость резания и допустимую величину подачи, что в конечном итоге ведет к сокращению машинного времени. Кроме того немаловажно значительное уменьшение разбивки отверстий и параметров шероховатости. Так при развертывании стали 20 разбивка уменьшается с 0,08 мм до 0,02 мм, а среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости – с 10 мкм до 0,5 мкм [3].

Эффективность применения ультразвука в процессах обработки материалов давлением определяется двумя основными факторами. Это снижение трения на границе инструмент–заготовка и уменьшение сопротивления пластическому деформированию.

Анализ технологических процессов волочения, прессования, штамповки показывает, что ультразвуковые колебания изменяют характер сил трения между поверхностью заготовки и инструмента и процесс пластического деформирования в очаге деформации. Основной задачей разработки технологических процессов обработки металлов давлением является правильный выбор типа колебаний и расположения очага деформаций. Максимальное изменение сил трения наблюдается в том случае, когда очаг деформаций располагается в пучности колебательной скорости; а максимум скорости пластической деформации соответствует расположению очага деформации в пучности напряжений (узел колебательной скорости).

Теми же факторами определяется и эффективность ультразвукового поверхностного пластического деформирования. Вследствие своих особенностей (высокой частоты, силы ударов) поверхностное пластическое дефор-

мирование ультразвуковым инструментом позволяет увеличить твердость, образовать в поверхностном слое сжимающие напряжения, снизить шероховатость, изменить микроструктуру поверхностного слоя.

Оценка износостойкости образцов вал-штука на машине трения показала, что упрочняющая ультразвуковая обработка почти в 2 раза повышает износостойкость образцов. Одновременно с испытаниями на износостойкость проводились усталостные испытания. Упрочняющая ультразвуковая обработка обеспечивает двукратное повышение предела выносливости по сравнению с обычной полировкой [1].

Перечисленные выше механизмы ультразвукового воздействия (уменьшение трения и сопротивления пластическому деформированию) лежат в основе управления процессами сборки и разборки соединений деталей.

Передача деталям собираемого или разбираемого соединения значительных ускорений изменяет характер трения, которое при наличии быстрых вибраций приобретает особенности квазивязкого [4].

Результаты исследований сборки прессовых соединений под действием ультразвуковых колебаний показали, что наложение колебаний позволяет значительно снизить усилие запрессовки, причём при увеличении натяга соединения и амплитуды колебаний изменение коэффициента трения на процесс сборки возрастает.

Ультразвуковая сборка прессовых соединений позволяет не только уменьшить требуемое усилие при механической сборке, но и снизить давление нагнетания масла при гидропрессовой сборке.

Ещё одним направлением применения ультразвука для управления характеристиками технологических процессов является интенсификация диффузионной сварки. Ультразвуковая сварка по сравнению с электросваркой позволяет приваривать тонкие проволоку и фольгу к массивным деталям, сваривать разнородные металлы.

Наиболее динамично развивающимся направлением производственных технологий являются аддитивные технологии. Ультразвуковая аддитивная технология также основана на взаимной диффузии соединяемых слоев материала. Основными преимуществами технологии является возможность получения композитных изделий сложной формы из разнородных материалов, таких как сталь, титан, медь и т.д.

Ультразвуковая обработка жидкостей и дисперсных систем

Среди многочисленных процессов, связанных с применением ультразвуковых колебаний, особое место занимают технологические процессы, протекающие в жидких и дисперсных средах. Это – очистка, дегазация, эмульгирование и др. [3].

Основными механизмами, определяющими эффективность воздействия ультразвука в жидких средах, являются ультразвуковая кавитация и акустические потоки.

Наиболее исследованным и распространённым ультразвуковым технологическим процессом является очистка. Этот вид обработки успешно используется при производстве, обслуживании и ремонте самых разнообразных изделий машиностроения. Основными преимуществами ультразвуковой очистки являются высокая эффективность, экологическая безопасность, а также возможность автоматизации процесса.

Существенно расширить область применения ультразвуковой очистки позволило применение высокоамплитудных режимов обработки. Выявлено, что при введении в жидкость колебаний с амплитудой излучателя более 12...15 мкм качественно меняется воздействие на обрабатываемые изделия. Благодаря образованию технологических зон, различных по интенсивности излучения и характеру физических процессов, не только удаётся повысить эффективность обработки, но и избежать риска кавитационных повреждений объектов обработки [1].

Схожим по воздействию с очисткой является процесс кавитационно-абразивной обработки. Добавление абразивных зёрен в озвучиваемую жидкость создаёт условия для уменьшения микронеровностей на внутренних и внешних поверхностях деталей. Так, например, применение кавитационно-абразивной обработки в аддитивной технологии после селективного лазерного плавления позволяет снизить шероховатость сложнопрофильных поверхностей получаемых изделий [5].

Ультразвуковое эмульгирование обладает широкими технологическими возможностями для получения эмульсий различного состава. Ультразвук позволяет получить эмульсии с размерами частиц 1...5 мкм. Эмульсии со столь малым размером частиц являются устойчивыми и не расслаиваются в течение нескольких часов.

Получение эмульсионных смазочно-охлаж-

дающих жидкостей (СОЖ) происходит при смешивании эмульсола и воды. Применение ультразвуковых колебаний для приготовления СОЖ позволяет на порядок снизить время перемешивания компонентов, а также добиться высокой стойкости эмульсии.

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) представляют собой суспензию пигментов в растворе плёнкообразующего полимера. Создание ультразвуковой технологии обработки ЛКМ позволило осуществлять равномерное перемешивание компонентов по всему объёму; снизить вязкость, уменьшить расход растворителя; понизить степень перетира ЛКМ, повысить укрывистость и улучшить цветораспределение лакокрасочного покрытия [6].

Кроме того, ультразвуковая обработка нашла применение при нанесении ЛКМ на окрашиваемую поверхность. Интенсификация пневматического распыления аэрозолей с помощью ультразвука обеспечивает возможность однослойного нанесения ЛКМ, снизить давление в пневмосистеме в 4 раза, повысить коэффициент массопереноса ЛКМ и снизить потери на туманообразование, значительно повысить адгезию покрытия за счёт снижения давления [6].

Использование углеродных нанотрубок при производстве пластиков, резин, композитов и металлов позволяет значительно повысить механические и электрические свойства изделий из этих материалов. Для активации возможностей и рационального использования нанотрубок необходимо проведение процесса дезагломерации. Воздействие ультразвуковой кавитации и акустических потоков различного масштаба не только способствуют разделению агломератов на отдельные элементы, но и позволяют получить тонкие дисперсии нанотрубок в жидких средах различной вязкости.

Заключение

Ультразвуковая обработка развивается не только как самостоятельное направление, но и для интенсификации широкого спектра способов получения и обработки материалов, улучшения их качественных характеристик.

Создание новых и модернизация существующих технологических процессов с использованием ультразвука создает условия для управления свойствами объектов обработки на микро- и субмикроуровне.

Практическая реализация ультразвукового воздействия на различные среды лежит в основе разработки инновационных направлений в технике и технологии машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приходько, В.М. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / под общей редакцией О.В.Абрамова и В.М. Приходько. – М.: Янус-К, 2006. – 688 с.
2. Казанцев, В.Ф. Физические основы технологического применения ультразвука: учеб. пособ. – М.:МАДИ(ГТУ), 2008. – 102 с.
3. Приходько, В.М., Фатюхин, Д.С., Казанцев, В.Ф., Нигметзянов, Р.И. Научно-технические технологии в машиностроении с применением ультразвука // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – №1(01). – С. 29–37.
4. Применение ультразвука при сборочно-разборочных операциях. Монография / В.Ф. Казанцев, В.М. Приходько, Д. С. Фатюхин и др. М.: Техполиграфцентр, 2008. – 146 с.
5. Конов, С.Г., Котобан, Д.В., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 28–34.
6. Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Панасенко, Д.Д. Использование ультразвуковых технологий при получении лакокрасочных покрытий в машиностроении // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №3(21). – С. 27–33.

REFERENCES

1. Prikhodko, V.M. *Power Ultrasound in Metallurgy and Mechanical Engineering* / under the general editorship of O.V. Abramov and V.M. Prikhodko. – M.: Janus-K, 2006. – pp. 688.
2. Kazantsev, V.F. *Physical Fundamentals of Ultrasound Technological Use: Textbook*. – M.:MADI(STU), 2008. – pp. 102.
3. Prikhodko, V.M., Fatyukhin, D.S., Kazantsev, V.F., Nigmatzyanov, R.I. Science intensive technologies in mechanical engineering with ultrasound use // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – №1(01). – pp. 29–37.
4. *Ultrasound Use in Assembly-Dismantling Operations*. Monograph / V.F. Kazantsev, V.M. Prikhodko, D.S. Fatyukhin et al. M.: Techpolygraphcenter, 2008. – pp. 146.
5. Konov, S.G., Kotoban, D.V., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Outlooks of ultrasonic technologies use in additive production // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 9(51). – pp. 28–34.
6. Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Panasenko, D.D. Ultrasonic technologies use at manufacturing lacquer coatings in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – №3(21). – pp. 27–33.

Рецензент д.т.н. А.А. Ситников

УДК 621.9.047

DOI: 10.12737/article_595256f198a9c5.31338189

В.П. Смоленцев, д.т.н.

(Воронежский государственный технический университет,

Воронеж, 394026, Московский пр., д. 14)

E-mail: vsmolen@inbox.ru

Инновационные технологии комбинированных методов обработки

Представлен анализ состояния научных исследований и достигнутых результатов внедрения комбинированных методов обработки изделий с использованием различных видов физико-химических воздействий, в которых хотя бы один относится к электрическим методам обработки. Приведены технологические возможности известных и новых комбинированных процессов, даны прогнозы по их эффективному применению в машиностроении.

Ключевые слова: электрические методы обработки; комбинированные методы; технология; достижения; перспективы.

V.P. Smolentsev, D. Eng.

(Voronezh State technical University, 14, Moskovsky Avenue, 394026 Voronezh)

Innovation technologies of combined machining methods

The analysis of the state of scientific investigations and the results achieved in the matter of the application of product combined machining methods with the use of various kinds of physicochemical impacts in which at least one refers to electric methods of working is presented. The technological possibilities of well-known and new combined processes are shown, the forecasts on their efficient use in mechanical engineering are given.

Keywords: electric methods of working; combined methods; technology; achievements; outlooks.

В последние годы широкое распространение получили электрические методы обработки, в том числе комбинированные процессы, где в качестве хотя бы одного воздействия используется тепловой или химический процесс, протекающий, как правило, под действием технологического тока.

Такие технологии следует относить к инновационным, так как они обеспечивают выпуск, в первую очередь, наукоемких изделий. Они позволяют изготавливать детали без силового механического контакта между электродом-инструментом и заготовкой, в том числе инструментами в форме несвязанных гранул или металлических щеток, способны обеспечивать высокую точность и качество поверхности в открытых и закрытых полостях облегченных (например, в летательных аппаратах) нежестких деталей из материалов, слабо поддающихся обработке металлическим и абразивным инструментом, а также при ограниченном доступе металлорежущего инструмен-

та в зону формообразования. Это способствует расширению области использования таких методов в различных отраслях машиностроения.

В табл. 1 приведены комбинированные методы обработки, технологические возможности которых могут использоваться, в основном, в наукоемких отраслях машиностроения. Некоторая часть этих методов известна на уровне изобретений Российских и зарубежных (главным образом японских) ученых. Уровень современных исследований позволяет проектировать перспективные инновационные технологии, востребованные в машиностроении.

Анализ табл. 1 и 2 позволяет выбрать для намеченной к обработке детали технологическую схему, рассчитать режимы обработки и проанализировать возможности использования предлагаемых комбинированных методов для наиболее эффективного достижения технологических показателей, заданных в чертеже детали.

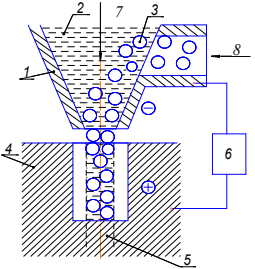
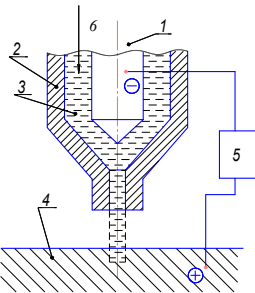
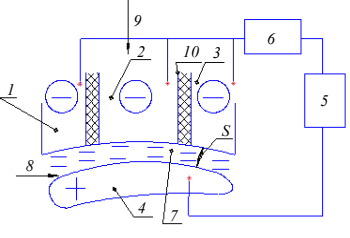
1. Комбинированные методы обработки (КМО) с наложением электрического поля [1 – 3]

КМО	Синтез известных методов	Основной вид воздействия	Основные инновационные приложения
1	2	3	4
Электроэрозионно-химический	Электроискровая обработка (ЭИСО)	Тепловое	Прошивание отверстий, полостей
	Электрохимическая размерная обработка (ЭХО)	Химическое	Маркирование сплавов с диэлектрическим покрытием
Электроабразивный	Механическое импульсное воздействие (МИВ)	Механическое силовое импульсное (МСИ)	Шлифование твердых токопроводящих материалов
	Электроконтактная обработка в жидкой среде (ЭКО)	Тепловое циклическое	Электрохимикоабразивное хонингование, притирка
Безабразивная полировка диэлектрическим притиром	ЭХО	Химическое (анодное растворение)	Отделочная обработка металлических заготовок с дополнительным электродом-инструментом и притиром из диэлектрика (например, из бука, минералокерамики)
	Механическое постоянное воздействие (МПВ)	Механическое силовое (МС) малой величины	
Электроконтактная обработка непрофилированным инструментом	ЭКО	Тепловое циклическое	Безразмерная и размерная черновая и чистовая обработка металлических заготовок (литье, штамповка и др.) электродом-щеткой
	МПВ	Механическое силовое прерывистое	
	МИВ	МСИ	
	ЭХО	Химическое	
Электрохимико-импульсно-механический	ЭХО	Химическое	Глубокое электрохимическое маркирование металлов
	МИВ	МС ударное	
Электрохимико-импульсный	ЭХО	Химическое	Разделение материалов с периодическим импульсом напряжения от внешнего источника
	ЭИСО	Тепловое импульсное	
	МИВ	МС	
	ЭКО	Тепловое циклическое	
Электроэрозионно-вибрационный	Электроэрозионное	Тепловое импульсное	Интенсивное прошивание отверстий
	Вибрация инструмента (заготовки) в направлении подачи инструмента	Механическое бесконтактное	
Электрохимико-ультразвуковой	ЭХО	Химическое	Интенсивная ЭХО при небольших размерах инструмента
	Ультразвуковые колебания (УЗК) с подачей колебаний на инструмент	Механическое бесконтактное высокочастотное	
	УЗК с подачей колебаний на рабочую среду	Механическое бесконтактное высокочастотное	Обработка глубоких отверстий малого сечения с прямой или криволинейной осью в металлических и диэлектрических прессованных материалах
Обработка несвязанными токопроводящими гранулами	ЭХО	Химическое	Чистовая безразмерная и размерная обработка труднодоступных для инструмента участков металлических заготовок
	МИВ	МСИ	
Электрохимический в управляемом магнитном поле	МИВ	МСИ	Безразмерная чистовая обработка свободным токопроводящим абразивом различных материалов
	Магнитное воздействие на токопроводящий абразивный порошок	Магнитное переменное поле	
	ЭХО	Химическое	Повышение точности за счет изменения вязкости рабочей среды и поляризации
	Воздействие на параметры рабочей среды	Магнитное переменное поле	
ЭХО с управляемым вектором действия электромагнитного поля	ЭХО	Химическое	Изготовление отверстий с различным положением оси. Формирование разделительной кромки при изготовлении листовых заготовок толщиной до 1 мм
	Электрическое поле на границе металлического шаблона	Магнитное поле	
Электроэрозионное восстановление деталей с термическим упрочнением	ЭИСО	Тепловое импульсное	Восстановление изношенных токопроводящих поверхностей с нанесением покрытия толщиной до 1,5 мм без общего нагрева детали
	ЭКО	Тепловое циклическое	
	Термодиффузия	Тепловое общее	
	Покрyтия	Тепловое	
	Упрочнение поверхностного слоя	Термическое локальное	

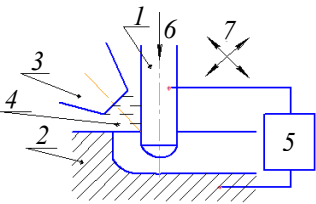
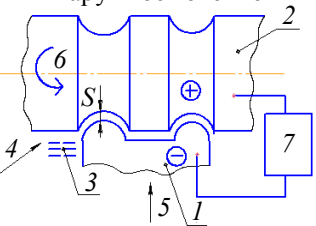
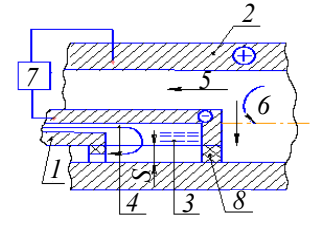
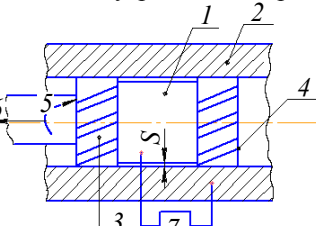
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Гальвано-механическое восстановление металлических деталей	Гальванопокрытие	Химическое	Восстановление изношенных токопроводящих деталей без их нагрева и последующей обработки
	Механическое	Механическое силовое циклическое	
Электроимпульсный разрядный	Высоковольтный электрический разряд	Тепловое	Очистка поверхности труб, литых деталей от окалины и загрязнений
	Ударная волна в жидкости	МСИ	
	Газообразование под загрязнением	Химическое	
	Электромагнитное	Магнитное	

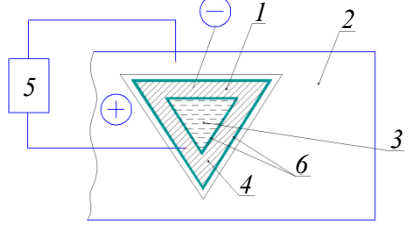
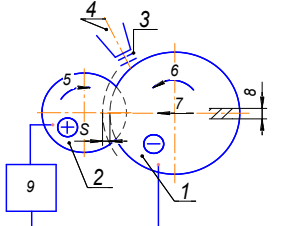
2. Технические возможности основных видов комбинированных методов обработки в машиностроении

Вид обработки	Технологические схемы ЭХО	Область преимущественного использования	Типовые объекты эффективного применения ЭХО
1	2	3	4
Обработка несвязанными гранулами	 <p>1 – сопло для подачи смеси электропроводящей жидкой рабочей среды (2) и твердых токопроводящих гранул (3); 4 – заготовка с труднодоступным для обработки отверстием (5); 6 – источник тока; 7 – подача жидкой рабочей среды; 8 – подача гранул</p>	Изготовление сложных углублений и отверстий в труднодоступных для инструмента участках деталей	Отверстия различного профиля, «облегчения» и технологические углубления преимущественно в корпусных деталях. Чистовая обработка внутренней поверхности баллонов, смесителей
Обработка струйным методом	 <p>1 – электрод-инструмент; 2 – форсунка; 3 – рабочая среда; 4 – заготовка; 5 – источник тока; 6 – подача рабочей среды</p>	Прошивка отверстий малого сечения для систем охлаждения тепловых двигателей. Вырезание контуров в листовых деталях	Турбинные лопатки, фильтры. Детали со сложным контуром
Обработка секционным инструментом	 <p>1, 2, 3 – секции электрода-инструмента; 4 – заготовка (штамповка лопатки реактивного двигателя); 5 – источник тока; 6 – коммутатор; 7 – жидкая рабочая среда; 8 – подача рабочей среды; 9 – подача секционного электрода-инструмента; 10 – диэлектрическая прокладка</p>	Обработка крупногабаритных участков деталей сложной формы	Лопатки лопаточных машин с большой хордой. Изготовление стержневых лент и других плоских и фасонных поверхностей с длинной трассой перемещения в зазоре рабочей среды

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
<p>Обработка непрофилированным стержневым инструментом (или проволокой)</p>	 <p>1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – сопло; 4 – рабочая среда; 5 – источник тока; 6 – подача электрода-инструмента; 7 – направления возможных перемещений электрода-инструмента</p>	<p>Формирование сложнопрофильных углублений в деталях небольших размеров</p>	<p>Гравировка, маркирование, изготовление ковочных штампов, прессформ с малой площадью обработки. Разделение листовых заготовок. «Облегчения» в деталях летательных аппаратов</p>
<p>Точение наружных и внутренних поверхностей</p>	<p>Наружное точение</p>  <p>1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – жидкая рабочая среда; 4 – подача рабочей среды; 5 – подача электрода-инструмента; 6 – вращение заготовки; 7 – источник тока; S – межэлектродный зазор</p>	<p>Обработка наружных поверхностей из труднообрабатываемых резанием материалов со сложной геометрией поверхности</p>	<p>Диски турбин из жаропрочных сплавов, титана. Нежесткие детали приборов, радиодеталей</p>
	<p>Расточка некруглых каналов</p>  <p>1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – жидкая рабочая среда; 4 – подача рабочей среды; 5 – подача электрода-инструмента; 6 – вращение заготовки; 7 – источник тока; 8 – диэлектрические прокладки; S – межэлектродный зазор</p>		<p>Длинные пустотелые валы двигателей, приводов круглого сечения. Валы переменного профиля некруглыми каналами и наружными поверхностями с ограниченным доступом инструмента в зону обработки</p>
<p>Протягивание</p>	<p>Протягивание внутренней поверхности</p>  <p>1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – передняя диэлектрическая направляющая; 4 – задняя диэлектрическая направляющая; 5 – подача рабочей среды; 6 – подача электрода-инструмента; 7 – источник тока</p>	<p>Обработка труднодоступных наружных и внутренних поверхностей, в том числе некруглого сечения</p>	<p>Длинномерные валы круглого сечения для приводов, трансмиссий машин. Закрытые или труднодоступны для инструмента наружные и внутренние участки валов, лонжеронов при обработке их электродами-инструментами нежесткой конструкции</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Разделение материала на штучные заготовки:		Изготовление нежестких деталей, получение заготовок из труднообрабатываемых материалов	Подрезка пружин и рессор. Заготовки из дефицитных или труднообрабатываемых материалов. По таким же схемам выполняют пазы, щели, сквозные отверстия с большой площадью сечения, фасонные отверстия
- по схеме трепанации;	 <p>1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – жидкая рабочая среда; 4 – деталь; 5 – источник тока; 6 – диэлектрическое покрытие</p>	Разделение труднообрабатываемых металлических материалов	Точные заготовки небольших габаритов. Обработка нежестких деталей из хрупких и вязких материалов
- разделение дисковым инструментом	 <p>1 – дисковый электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – жидкая рабочая среда; 4 – насадка; 5; 6 – вращение электродов; 7 – подача электрода-инструмента; 8 – толщина диска; 9 – источник тока</p>	Разделение преимущественно круглых заготовок без образования заусенцев и острых кромок	Нежесткие металлические детали

Заключение

Приведенные в статье сведения показывают состояние и перспективные направления научных и прикладных исследований на ближайшие годы [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

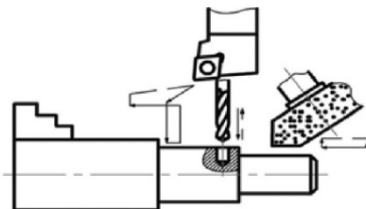
1. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.
2. Комбинированные методы повышения качества поверхностного слоя материалов/ В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.В. Иванов, Е.В. Смоленцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. №1 (321). – С. 90 – 96.
3. Степанов, Ю.С., Бурнашов, М.А. Раскрой листовых неметаллических материалов водоледяной струей высокого давления // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2014. № 8(38). С. 23–28.
4. Научноёмкие технологии в машиностроении /

А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

REFERENCES

1. Smolentsev, E.V. Designing electric and combined methods of machining. – М.: *Mechanical Engineering*, 2005. – pp. 511.
2. Combined methods for quality increase in surface layer of materials/ V.P. Smolentsev, M.V. Kondratiev, V.V. Ivanov, E.V. Smolentsev // *Fundamental and Applied Problems of Techniques and Technology*. 2017. №1 (321). – pp. 90 – 96.
3. Stepanov, Yu.S., Burnashov, M.A. Sheet non-metal material cutting with water-ice high pressure jet // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014. № 8(38). pp. 23–28.
4. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering / A.G. Syslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezyazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. М.: *Mechanical Engineering*, 2012. – pp. 528.

Рецензент д.т.н. А.Г. Суслов



УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_595256f1a5fff7.38096621

В.Ф. Безъязычный, д.т.н.,

М.В. Басков, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П. А. Соловьева», 152900, Россия, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53)

E-mail: technology@rsatu.ru

Расчётное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей

Исследовано влияние износостойких покрытий режущего инструмента на параметры процесса резания и характеристики качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей: остаточные напряжения, степень и глубина наклепа поверхностного слоя, шероховатость поверхности.

Ключевые слова: износостойкое покрытие; качество поверхностного слоя; коэффициент трения; остаточные напряжения; степень и глубина наклепа; шероховатость поверхности.

V.F. Beziyazychny, D. Eng.,

M.V. Baskov, Can. Eng.

(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk", 53, Pushkin Str., Rybinsk, 152900, Russia)

Rated definition of degree of cutter coating influence upon parameters of surface layer quality of parts worked

The impact of cutter wear-resistant coatings upon cutting process parameters and characteristics of surface layer quality in the parts worked: residual stresses, a degree and a depth of work hardening of a surface layer, surface roughness is investigated.

Keywords: wear-resistant coating; surface layer quality; friction factor; residual stresses; degree and depth of work hardening; surface roughness .

Задача обеспечения требуемых параметров, характеризующих качество поверхностного слоя деталей машин, актуальна для авиационного и других отраслей машиностроения, где разрушение ответственных деталей может привести к катастрофе. Параметры, характеризующие качество поверхностного слоя обработанных деталей, в значительной степени определяют эксплуатационные свойства деталей машин.

Известные методики расчетного определения параметров, характеризующих качество поверхностного слоя после механической обработки, базируются на учете преимущественного влияния или теплового, или силового факторов. Эти методики, как правило, не учитывают действие объемных источников тепла

в зоне резания, а также упрочнение поверхностного слоя детали в процессе обработки.

При изготовлении деталей газотурбинных двигателей, относящихся к категории ответственных (валы, диски, корпуса компрессора и др.), преимущественно используются операции механообработки, в частности, обработка точением. До настоящего времени недостаточно изучены закономерности влияния широко применяемых в производстве покрытий режущих инструментов на механизмы формирования параметров, характеризующих качество поверхностного слоя, и эксплуатационные свойства деталей газотурбинных двигателей.

В связи с этим, на сегодняшний день актуальным является исследование влияния нано-

структурированных покрытий режущих инструментов на параметры, характеризующие качество поверхностного слоя материала деталей, изготавливаемых точением.

В наукоёмком производстве используются инструменты с износостойкими покрытиями, что оказывает влияние на трибологические характеристики процесса резания, тепловыделение, силу резания, и как следствие, влияет на параметры качества поверхностного слоя детали и её эксплуатационные свойства. Покрытия инструмента существенно изменяют параметры процесса резания: они уменьшают длину контакта стружки с поверхностями инструмента, силу резания, снижают температуру в зоне резания и деформацию срезаемого припуска, увеличивают угол схода стружки.

Основная цель данного исследования – разработка расчетных зависимостей для определения технологических условий обработки точением, которые обеспечивают требуемое качество поверхностного слоя детали.

$$\sigma_{\text{он}}^y = \left[-\delta + \frac{\int_{r_{\text{в}}}^{r_{\text{он}}} \delta E r dr + \int_{r_{\text{он}}}^{r_{\text{н}}} D \delta r dr - \int_{r_{\text{он}}}^{r_{\text{н}}} \sigma_{\text{T}} \left(1 - \frac{r}{E}\right) r dr}{\int_{r_{\text{в}}}^{r_{\text{он}}} E r dr + \int_{r_{\text{он}}}^{r_{\text{н}}} D r dr} \right] \frac{E}{1 - \mu},$$

где E – модуль упругости обрабатываемого материала, Па; D – модуль упрочнения материала в процессе обработки, МПа; r – рассматриваемый радиус детали, м; $r_{\text{в}}$ – внутренний радиус детали с отверстием, м; $r_{\text{н}}$ – наружный радиус детали, м; $r_{\text{он}}$ – граница раздела пластических и упругих деформаций в осевом направлении, м; σ_{T} – предел текучести материала детали, Па; μ – коэффициент Пуассона материала детали; $\delta = \beta_1 \theta$ – относительное температурное линейное расширение материала детали; θ – температура в рассматриваемом слое обрабатываемой детали, °С; β_1 – коэффициент температурного линейного расширения материала детали, °С⁻¹.

Температура резания θ определялась по интегральным зависимостям при действии объемных источников тепла. На рис. 1 представлены: объемный источник тепла $ABKNA$, возникающий в зоне основных пластических деформаций металла снимаемого припуска; объемный источник тепла ANN_1A_1A , возникающий впереди инструмента в результате пластических деформаций в поверхностном слое детали; объемный источник тепла $ДАА_2Д_1Д$, возникающий на площадке контакта инструмента с

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать теоретические зависимости для расчета параметров качества поверхностного слоя детали с учетом износостойких покрытий режущего инструмента, объемных источников тепла в зоне резания, упрочнения обрабатываемого материала и других факторов;

- сопоставить расчетные и экспериментальные значения параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных инструментами с износостойкими покрытиями.

Для расчета остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали от действия теплового и силового фактора с учетом упрочнения были использованы зависимости, полученные в работе [1]. Например, для расчета осевых напряжений в поверхностном слое детали при нагревании использовалась формула

деталью AD в результате взаимного трения.

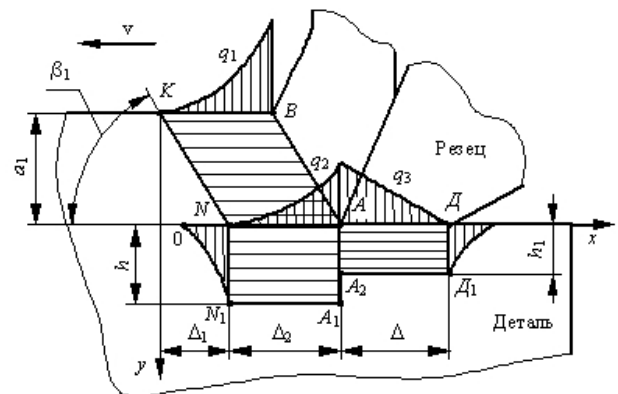


Рис. 1. Схема действия объемных источников тепла (на резце выделена область износостойкого покрытия) [1]

Интенсивность тепловыделения для первого, второго и третьего источников тепла будет определяться соответственно [2]:

$$q_1 = \frac{q_{AB} \cdot a_1 \cdot \frac{1}{\sin \beta_1}}{\int_0^{\Delta_2} \int_0^{a_1} \exp \left[-n \left(1 - \frac{x_1 - y_1 \cdot \text{ctg} \beta_1}{\Delta_2} \right) \right] dy_1 dx_1};$$

$$q_2 = \frac{q_{AB} \cdot a_1 \cdot \frac{1}{\sin \beta_1}}{\int_0^{\Delta_2} \int_0^h \exp\left[-n\left(1 - \frac{x}{\Delta_2}\right)\right] \cdot \exp\left[-p \frac{y}{h}\right] dy_2 dx_2};$$

$$q_3 = \frac{p}{1 - \exp(-p)} \cdot \frac{\tau_p \cdot v}{h_1},$$

где h – размер источника тепла ANN_1A_1A вдоль оси y , м; h_1 – размер источника тепла $ДAA_2D_1D$ вдоль оси y , м; $p = 5$ – константа, характеризующая распределение интенсивности тепловыделения; β_1 – угол условной плоскости сдвига, градус; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па; v – скорость движения теплового источника (скорость резания), м/мин; x_i и y_i – координаты линейного источника, м; x и y – координаты рассматриваемой точки, м; q – интенсивность источника тепла.

$$q_{AB} = \frac{\tau_p v}{\sqrt{1 + B^2}}, \text{ Дж/(м·мин)},$$

где $B = 1/\text{tg}\beta_1$ – безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень влияния пластических деформаций снимаемого припуска и материала поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Были выполнены расчеты температуры резания для вариантов действия плоских и объемных источников тепла. Рассматривалась обработка заготовки $\varnothing 98$ мм при различных скоростях резания (сплав ЭИ437Б; глубина резания 1 мм; подачи 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 мм/об; резец с пластиной из твердого сплава ВК6 с геометрией режущей части: $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 5^\circ$; $\rho = 10$ мкм; $r = 1$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$). В результате сопоставления экспериментальных данных и результатов расчета по каждому из рассматриваемых вариантов установлено, что при увеличении подачи температура резания с учетом действия плоских источников тепла значительно меньше экспериментального значения (рис. 2).

Для определения влияния режущего инструмента на температуру резания производился ее расчет с учетом действия объемных источников тепла, с учетом изменения интенсивности тепловыделения по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Результаты расчетов показали, что покрытия режущего инструмента (TiSiAl)N и Al_2O_3 значительно снижают температуру резания по сравнению с инструментом без покрытия при точении образцов из коррозионностойкой ста-

ли ЭК26. Разница достигает 25 % при скорости резания 1,4 м/с и подаче 0,2 мм/об (рис. 3). При этом влияние покрытия (TiSi)N на температуру в зоне резания значительно ниже.

При обработке жаропрочного сплава ЭИ437Б покрытия режущего инструмента значительно меньше снижают температуру в зоне резания в отличие от обработки аналогичных образцов из стали ЭК26.

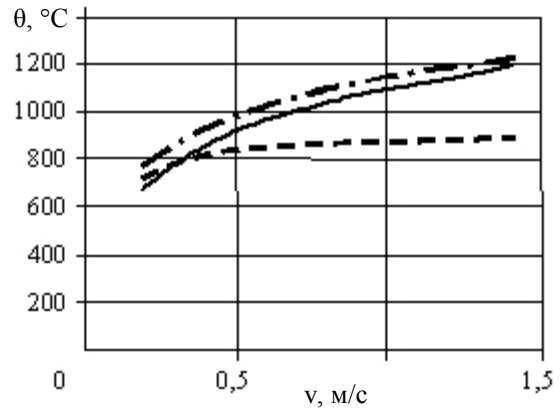


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения температуры в зоне резания при обработке детали из сплава ЭИ437Б (подача 0,3 мм/об):

$\theta_{экс}$ – экспериментальное значение температуры резания; $\theta_{пл}$ – температура резания, рассчитанная с учетом действия плоских источников тепла; $\theta_{об}$ – температура резания, определенная с учетом действия объемных источников тепла;
 — $\theta_{экс}$; - - - $\theta_{пл}$; - · - $\theta_{об}$

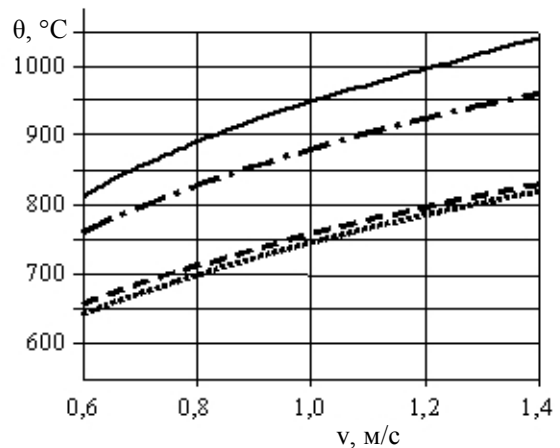


Рис. 3. Температура резания при обработке образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 (подача 0,2 мм/об):

— ВК6; - - - (TiSi)N; - · - (TiSiAl)N; Al_2O_3

Различие характера влияния покрытий режущего инструмента на значения температуры в зоне резания при обработке образцов из сталей ЭК26 и ЭИ437Б объясняется изменением тепловой интенсивности источников деформации и трения по передней поверхности

инструмента.

Применение покрытий режущего инструмента (TiSi)N, Al₂O₃ при обработке образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 заметно снижают силу резания *Pz* по сравнению с вариантом обработки инструментом без покрытия (различие значений достигает 15 %). Применение покрытия (TiSiAl)N несущественно снижает силу резания *Pz*. Применение покрытий режущих инструментов при обработке жаропрочного сплава ЭИ437Б практически не оказывает влияния на силу резания *Pz*.

Причиной снижения силы резания *Pz* при применении покрытий является изменение коэффициента укорочения стружки, напрямую зависящего от безразмерного комплекса процесса резания *B* и изменения адгезионных процессов в сочетании инструментального и обрабатываемого материалов.

Были выполнены эксперименты с целью сопоставления расчетных и экспериментальных значений сил и температур в зоне резания при обработке образцов из стали ЭК26. Технологические условия проведения эксперимента были следующие: глубина резания 1 мм; скорость резания 1,3 м/с; значения подачи 0,07 мм/об, 0,14 мм/об и 0,2 мм/об; задний угол $\alpha = 15^\circ$; передний угол $\gamma = 5^\circ$; радиус при вершине резца $r = 1$ мм; главный и вспомогательный углы в плане $\phi = \phi_1 = 45^\circ$.

В качестве инструментального материала при проведении экспериментальных исследований применялся твердый сплав MC321 (аналог ВК6) без покрытия и твердый сплав MC321 с нанесенными нитридными наноструктурированными покрытиями (TiSiAl)N и (TiSi)N.

Определение температуры резания производилось на основе замера термо-ЭДС естественной термопары заготовка – резец. Регистрирование составляющих сил резания *Pz*, *Py* и *Px* производилось универсальным динамометром УДМ-600.

При проведении эксперимента были произведены замеры значения силы резания *Pz* и температуры резания θ (табл. 1). Расчетные значения и результаты проведенных экспериментов имеют хорошую степень корреляции (значение коэффициента Пирсона 0,63).

Изучено также влияние покрытий режущих инструментов на величину остаточных напряжений, степень и глубину наклепа, значение параметра шероховатости поверхности *Rz*.

При обработке образцов из жаропрочного сплава ЭИ437 выявлено незначительное влияние покрытий режущих инструментов на ве-

личину суммарных остаточных напряжений. При обработке коррозионностойкой стали ЭК26 все рассматриваемые покрытия значительно снижают величину остаточных напряжений и глубину их залегания. В частности, при использовании покрытия Al₂O₃ и подаче 0,14 мм/об, глубина залегания неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений снижается на 35 % (рис. 4, эпюра получена с помощью имитационного моделирования остаточных напряжений).

1. Расчетные и экспериментальные значения силы резания *Pz* и температуры резания θ при чистовом точении образцов из стали ЭК26 (глубина резания $t = 1$ мм; скорость резания $v = 1,3$ м/с)

Подача, мм/об	Покрытие	Экспериментальные значения		Расчётные значения	
		<i>Pz</i> , Н	θ , °С	<i>Pz</i> , Н	θ , °С
0,07	Отсутствует	203	701	230	780
	(TiSiAl)N	185	660	220	750
	(TiSi)N	170	620	198	650
0,14	Отсутствует	380	850	392	950
	(TiSiAl)N	360	797	375	880
	(TiSi)N	350	758	334	760
0,2	Отсутствует	493	940	525	1010
	(TiSiAl)N	460	844	480	940
	(TiSi)N	452	794	440	815

Причиной различия величин и глубин залегания остаточных напряжений являются разные значения коэффициентов трения сочтения деталь – инструмент, приводящие к изменению внутреннего трения и течения поверхностных слоев материала обрабатываемой детали, а также влияние температурного фактора [3].

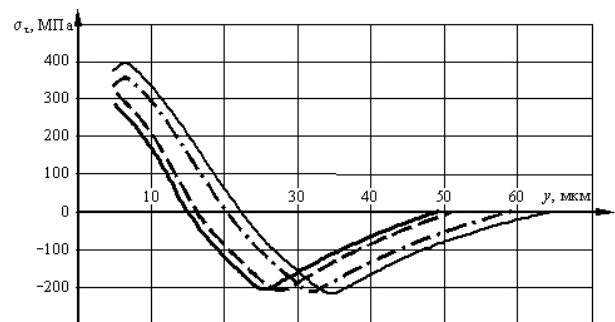


Рис. 4. Эпюра остаточных напряжений при обработке образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 (подача 0,14 мм/об) :

— без покрытия; — — (TiSi)N;
- · - · (TiSiAl)N; — Al₂O₃

Для сравнения результатов теоретических расчетов, полученных с помощью разработанного программного обеспечения, были прове-

дены эксперименты по обработке точением образцов из коррозионностойкой стали ЭК26 с последующим определением параметров качества поверхностного слоя. Технологические условия проведения эксперимента приведены выше. В качестве исследуемого инструментального материала рассматривались: твердый сплав MC321 (аналог BK6) без покрытия и твердый сплав MC321 с нитридными наноструктурированными покрытиями (TiSiAl)N и (TiSi)N. Эпюры остаточных напряжений представлены на рис. 5. Значения расчетных остаточных напряжений показывают достаточно хорошее совпадение.

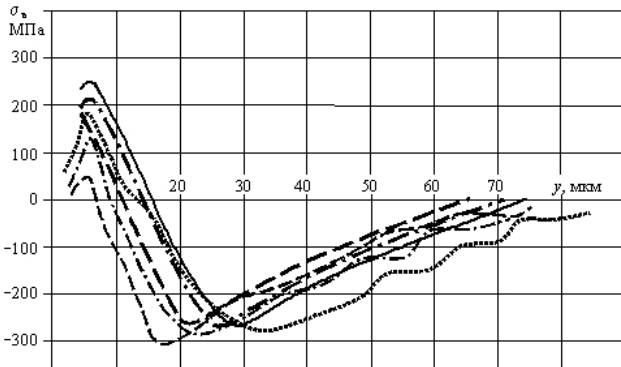


Рис. 5. Эпюры остаточных напряжений при точении образца из стали ЭК26 (0,2 мм/об): расчет — BK6; — . — . (TiSiAl)N; — — — (TiSi)N; эксперимент BK6; — . — . — . (TiSiAl)N; — — — — (TiSi)N

Значения параметров наклепа и шероховатости, а также максимальные значения неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое приведены в табл. 2.

На величину параметра шероховатости *Rz* обработанной поверхности применение покрытий (TiSi)N и (TiSiAl)N в целом влияет положительно, обеспечивая снижение значений параметра шероховатости *Rz* обработанной поверхности при использовании покрытия (TiSi)N на 10 %. Покрытие режущего инструмента Al₂O₃ не оказывает практически никакого влияния на шероховатость обработанной поверхности (см. табл. 2).

Глубина и степень наклепа значительно зависят от применения покрытий Al₂O₃, (TiSi)N, (TiSiAl)N, при этом покрытие Al₂O₃ позволяет снизить значения глубины и степени наклепа обработанной поверхности на 40 % по сравнению со значениями, полученными при использовании аналогичного твердосплавного инструмента без покрытия (см. табл. 2).

2. Шероховатость поверхности *Rz*, глубина наклепа *h*, максимальные остаточные напряжения

Покрытие	Подача		
	0,07 мм/об	0,14 мм/об	0,2 мм/об
	Высота неровностей профиля <i>Rz</i> , мкм		
Отсутствует	0,6	2,1	3,9
(TiSi)N	0,5	1,7	2,4
(TiSiAl)N	0,5	2,0	3,0
Al ₂ O ₃	0,6	2,0	3,5
	Глубина наклепа, мкм		
Отсутствует	8	18	24
(TiSi)N	6	11	14
(TiSiAl)N	6	11	14
Al ₂ O ₃	5	11	14
	Максимальные остаточные напряжения, Мпа		
Отсутствует	510	400	250
(TiSi)N	420	320	190
(TiSiAl)N	470	360	220
Al ₂ O ₃	400	290	170

Заключение

1. Покрытия режущего инструмента оказывают благоприятное влияние на параметры качества поверхностного слоя детали, уменьшая степень и глубину наклепа, глубину залегания остаточных напряжений, снижая шероховатость обработанной поверхности.

2. Чем ниже коэффициент трения в зоне резания и меньше толщина износостойкого покрытия режущего инструмента (острее режущие кромки), тем сильнее благоприятное влияние покрытия на параметры качества поверхностного слоя детали.

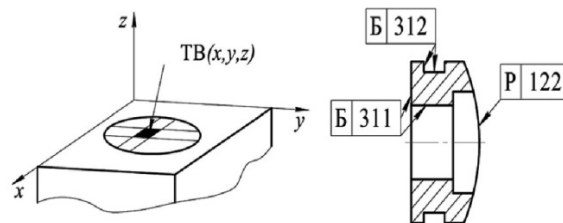
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Безъязычный, В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения [Текст] / В. Ф. Безъязычный. – М: Машиностроение, 2012. – 317 с.
 2. **Басков, М.В.** Исследование влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя и сопротивление усталости деталей при обработке точением // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. 2017. №8. – С. 38–43.
 3. **Шустер, Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел [Текст] / Л. Ш. Шустер. – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.

REFERENCES

1. Beziyazychny, V.F. *Similitude Method in Engineering Techniques* [Text] / V. F. Beziyazychny. – M: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 317.
 2. Baskov, M.V. Investigation of cutter coatings impact upon quality parameters of surface layer and wear-resistance of parts during turning // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk*. 2017. №8. – pp. 38–43.
 3. Shuster, L.Sh. *Adhesive Contact of Metal Solids* [Text] / L. Sh. Shuster. – Ufa: Gilem, 1999. – pp. 199.

Рецензент д.т.н. А.В. Хандожко



УДК 621.8

DOI: 10.12737/article_595256f1b41d16.38352795

А.Г. Суслов, д.т.н.

(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, 115409, Каширское шоссе, 31)

E-mail: mootechmash@mail.ru

Конструкторско-технологическое обеспечение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения

Изложено решение проблемы обеспечения конкурентоспособности и качества изделий машиностроения при их проектировании и изготовлении. Приведена зависимость для определения комплексного коэффициента конкурентоспособности изделия машиностроения. Дано понятие оптимальной долговечности. Приведены структурные схемы решения задачи конструктора и технолога по обеспечению качества изделий машиностроения.

Ключевые слова: конкурентоспособность; качество; оптимальная долговечность; проектирование; изготовление; изделие машиностроения.

A.G. Syslov, D. Eng.

(National Research Nuclear University "MIFI", 31, Kashirskoye Shosse, 115409, Moscow)

Design-technological support of quality and competitive ability of engineering products

The solution of the problem of the assurance of competitive ability and quality of engineering products during their design and manufacturing is stated. The dependence for the definition of a complex factor of engineering product competitive ability is shown. The concept of life optimum is given. The structural procedures for the solution of problems of a designer and technologist for the assurance of engineering product quality are shown.

Keywords: competitive ability; quality; optimum life; designing; manufacturing; engineering product.

Конкурентоспособность любых машин определяется комплексным показателем K [1]:

$$K = O.P. / (Ц + Э.З.), \quad (1)$$

где O.P. – объем работ, который выполняет машина за срок ее морального старения (5 лет), руб.; Ц – цена изделия, руб.; Э.З. – эксплуатационные затраты на обслуживание и ремонт этой машины за этот же срок (5 лет), руб.

Чем больше значение этого коэффициента, тем выше конкурентоспособность машины. Следует отметить, что технология является основой для проектирования конкурентоспособных машин. Если машина проектируется под реализацию устаревшей технологии (например, строительства автомобильных и железных дорог, их обслуживания и ремонта), то она никогда не будет конкурентоспособной. Все современные машины являются мехатронными сис-

темами: исполнительные звенья – механические, звенья управления – электронные.

Конкурентоспособность изделий машиностроения в значительной мере определяется их качеством. Под качеством понимается совокупность свойств изделия удовлетворять потребности потребителя в соответствии с его функциональным назначением.

Одним из основных свойств качества машин является их надежность [2]. Надежность электронных систем управления определяется надежностью каждого отдельного элемента системы и повышается за счет улучшения их качества и дублирования.

Надежность – это комплексное понятие, включающее в себя безотказность и долговечность. Под безотказностью изделия понимается сохранение работоспособного состояния изделия до первого отказа. Долговечность – это свойство изделия сохранять свое работоспо-

собное состояние до полного разрушения. Для одних изделий, в частности ракет, основным является безотказность, для остальных (почти всех) изделий основным показателем является долговечность.

Причем долговечность проектируемых деталей должна быть оптимальной, т.е. это период времени, в течение которого на нее приходится минимальные совокупные годовые затраты:

$$\frac{\sum_{i=1}^{T_{opt}} C_{з.д.i}}{T_{opt}} \rightarrow \min,$$

где $C_{з.д.i}$ – совокупные затраты, приходящиеся на деталь в i -м году эксплуатации изделия; T_{opt} – оптимальная долговечность детали.

Оптимальная долговечность деталей не всегда совпадает с оптимальной долговечностью машины, которую желательно приравнять к моральному сроку ее старения.

При этом могут быть несколько вариантов:

1. Долговечность детали меньше межремонтного срока машины. В этом случае необходимо повышать долговечность детали до межремонтного срока, т.е. $T_{opt.д} = T_{м.р}$.

2. Долговечность детали больше межремонтного срока, но меньше оптимального срока использования машины. В этом случае необходимо повышать долговечность детали до оптимальной долговечности машины: $T_{opt.д} = T_{opt.м}$.

3. $1,5T_{opt.м} > T_{д} > T_{opt.м}$. В этом случае необходимо снижать долговечность детали, а следовательно, и себестоимость ее изготовления: $T_{opt.д} = T_{opt.м}$.

4. $2T_{opt.м} > T_{д} > 1,5T_{opt.м}$. Необходимо повышать долговечность детали с целью ее использования в новой машине: $T_{opt.д} = 2T_{opt.м}$.

5. Долговечность детали больше двух оптимальных сроков машины. В этом случае необходимо снижать долговечность детали, а следовательно, и себестоимость ее изготовления: $T_{opt.д} = 2T_{opt.м}$.

Как безотказность, так и долговечность изделий определяется рядом эксплуатационных свойств деталей и их соединений: износостойкостью, статической и усталостной прочностью, коррозионной стойкостью, герметичностью соединений, прочностью посадок и др. [3]. Все эти эксплуатационные свойства зависят от материала, точности размеров, качества рабочих поверхностей и условий эксплуатации.

Общая структурная схема решения задачи конструктора в обеспечении качества выпускаемых изделий приведена на рис. 1.

Основной задачей технолога в обеспечении

оптимальной долговечности деталей машин является разработка технологического процесса, обеспечивающего требуемую точность размеров и качество рабочих поверхностей с наименьшей технологической себестоимостью. Структурная схема алгоритма решения задачи технолога по обеспечению требуемого качества деталей с наименьшей технологической себестоимостью приведена на рис. 2.

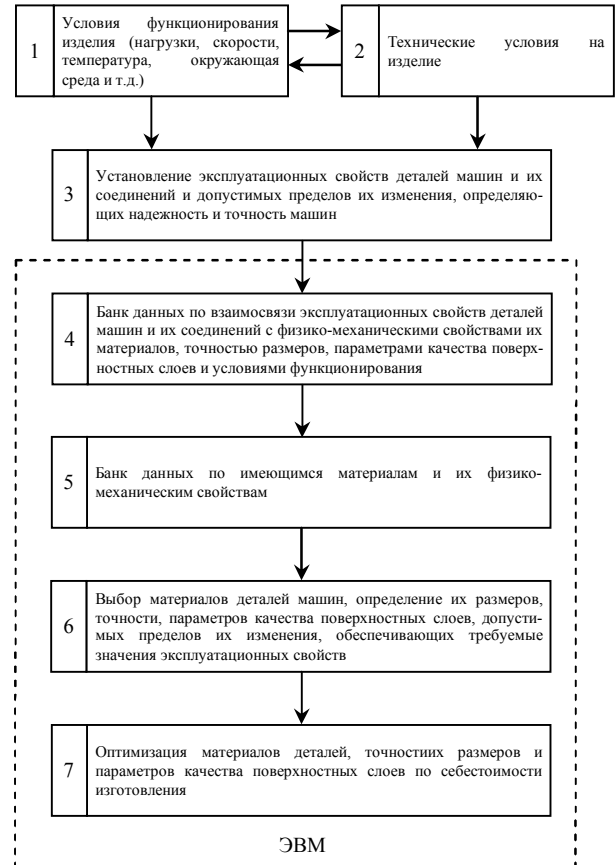


Рис. 1. Структурная схема алгоритма решения задачи конструктора

Выбор предшествующих методов и режимов обработки (блок 7) осуществляется из условия, что каждый последующий метод обработки позволяет повысить точность размеров на 1 – 2 качества и уменьшить высотные параметры шероховатости в 3 – 4 раза. При этом оптимизация выбора методов и режимов осуществляется по технологической себестоимости (аналогично блоку 5).

Анализ структурных схем алгоритмов решения задачи конструктора (см. рис. 1) и технолога (см. рис. 2) показывает на возможность и целесообразность их объединения, а именно возможность непосредственного технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин (рис. 3) [3].

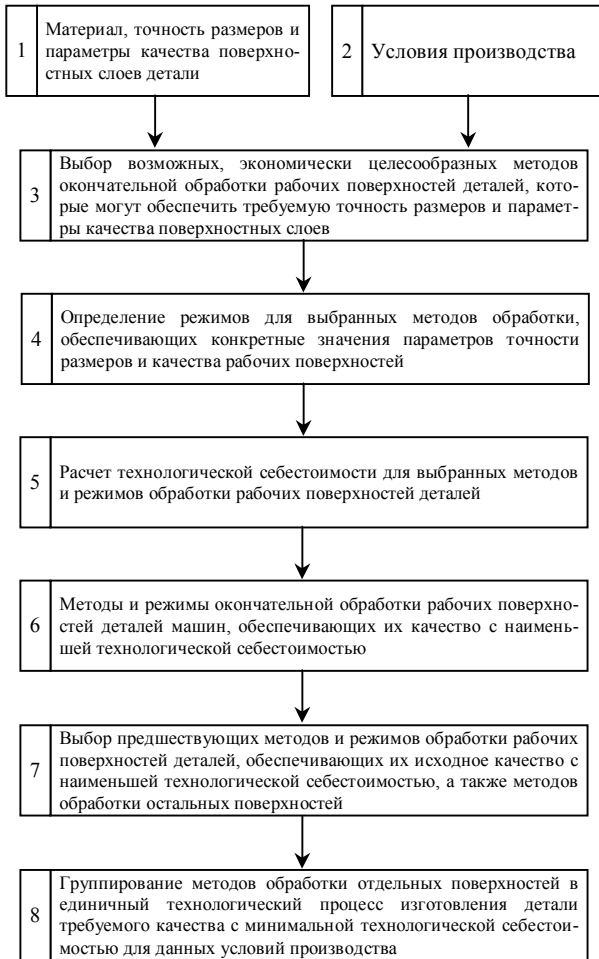


Рис. 2. Структурная схема алгоритма решения задачи технолога

Но для этого необходимо иметь справочные данные по технологическому обеспечению непосредственно эксплуатационных свойств. Эти данные могут быть получены теоретически и экспериментально. Теоретически – на основе рассмотрения единства процесса обработки и эксплуатации деталей, в частности с применением энергетической теории. Экспериментально – применением эмпирических уравнений взаимосвязи эксплуатационных свойств с режимами обработки.

Для ускорения накопления такого справочного материала необходимо использовать результаты, получаемые в различных научных школах. Для этого они должны выполняться по единой методике. С этой целью разработаны нормализованные методы экспериментальных исследований различных эксплуатационных свойств [4, 5].

Создание автоматизированной системы проведения и обработки результатов таких исследований (АСНИ) позволило получить эмпирические зависимости эксплуатационных свойств от режимов обработки рабочих поверхностей.

Как было сказано, для выпуска конкурентоспособных изделий зачастую возникает необходимость повышения долговечности отдельных деталей до ее оптимального значения. С этой целью используются различные технологические методы обработки рабочих поверхностей и нанесения износостойких и коррозионно-стойких покрытий.



Рис. 3. Структурная схема одноступенчатого решения конструкторско-технологической задачи обеспечения качества проектируемой машины

В частности, для повышения долговечности деталей при обработке наиболее широкое применение в промышленности получили отделочно-упрочняющие методы поверхностно-пластического деформирования. Результаты исследований по повышению долговечности деталей машин при различных статических и динамических методах отделочно-упрочняющей обработки ППД приведены в справочниках [6].

В последние годы большое внимание уделя-

ется разработке наукоемких и функционально-ориентированных технологий [7]. К наукоемким технологиям относятся технологии, базирующиеся на последних достижениях науки и техники. Функционально-ориентированные технологии – это технологии, разрабатываемые с учетом функционального назначения рабочих поверхностей деталей машин.

Качество выпускаемых изделий в значительной мере зависит от реализации технологических процессов на производстве. Для России это особенно актуально, так как иногда на промышленных предприятиях наблюдается нарушение технологической дисциплины. Для строжайшего ее соблюдения целесообразно вводить повременную оплату труда и осуществлять автоматизацию производства. В организационном плане для соблюдения технологической дисциплины необходимо ритмично обеспечивать снабжение рабочих мест режущим инструментом.

Как видно из формулы (1), конкурентоспособность выпускаемых изделий в значительной мере зависит от их цены, которая в основном определяется технологической себестоимостью изготовления. В свою очередь, технологическая себестоимость зависит от производительности. Производительность же, в большей мере, определяется используемым технологическим оборудованием и профессионализмом технических работников предприятия. Кроме того, эти предприятия должны кооперироваться с другими конкурентоспособными предприятиями, поставляющими им комплектующие изделия. Этим, как правило, обладают предприятия серийного, крупносерийного и массового производства.

Таки образом, можно сделать вывод, что для выпуска в России конкурентоспособных и высококачественных изделий машиностроения необходимо технологическое переоснащение существующих и создание новых промышленных предприятий, оснащенных современным конкурентоспособным технологическим оборудованием. Для этого в современных условиях требуется срочное создание собственных станко-инструментальных предприятий, т.е. возрождение станко-инструментальной промышленности, выпускающей самообучающиеся станки с адаптивным управлением качеством изделий и установки по «выращиванию» заготовок, легко встраивающихся в компьютеризированные производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Качество** машин: справочник: в 2 т. Т. 2. / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
2. **Качество** машин: справочник: в 2 т. Т. 1. / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
3. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / Суслов А.Г., Фёдоров В.П., Горленко О.А. и др. /под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
4. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
5. **Суслов А.Г., Дальский А.М.** Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
6. **Технология** и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2-х т. Т1. / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.
7. **Научно-технические** технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

REFERENCES

1. *Machine Quality: Reference Book: in 2 Vol. Vol. 2.* / A.G. Syslov, Yu.V. Gulyaev, A.M. Dalsky et al. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 430.
2. *Machine Quality: Reference Book: in 2 Vol. Vol. 1.* / A.G. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 256.
3. *Technological Support and Operation Properties Increase in Parts and Their Joints* / Suslov A.G., Fyodorov V.P., Gorlenko O.A. et al. /under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 448.
4. *Parts Surface Engineering* / Author group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
5. Suslov A.G., Dalsky A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Techniques.* – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.
6. *Technology and Tools of Finish-strengthening of Parts with Surface Plastic Deformation: Reference Book. In 2 Vol., Vol. 1.* / Under the general editorship of A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering, 2014. pp. 480.
7. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Beziyazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 528.

Рецензент д.т.н. О.Н. Федонин

Б.М. Базров, д.т.н
(ФГБУН ИМАШ им.Благодорова, Россия,
101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4)
E-mail: modul_lab@mail.ru

Анализ классификаций изделий машиностроения

Показана важность классификаций изделий для развития машиностроения. Рассмотрены общие классификации машин и изделий машиностроения. Отмечено отсутствие единого методического подхода в построении классификаций.

Ключевые слова: классификация; изделие; метод; иерархический метод; фасетный метод; структура; уровень; классификационный признак.

B.M. Bazrov, D. Eng.
(Blagoravov FSBUN IMACH, 4, Maly Kharitonievsky Lane, Moscow, 101990)

Analysis and classification of engineering parts

A possibility of product classifications for mechanical engineering development is shown. General classifications of machines and engineering products are considered. The absence of a single methodical approach in classifications formation is emphasized.

Keywords: classification; product; method; hierarchical method; faceted method; structure; level; classification sign.

Классификация широко применяется в различных областях деятельности человека. Классификация изделия имеет важное теоретическое и практическое значение в машиностроении. Например, классификация изделий позволяет эффективно решать задачи унификации и стандартизации изделий, определять направления развития изделий, создавать базы данных и т.д. В связи с этим представляет интерес состояние классификаций изделий.

Надо отметить, что одно и то же множество объектов можно классифицировать по-разному, в зависимости от поставленной задачи.

Как известно, изделие на протяжении своего жизненного цикла проходит этапы изготовления, эксплуатации и утилизации. Каждый из этапов требует своей классификации изделий, поскольку на этих этапах решаются разные задачи.

Для этапа эксплуатации изделие создается под осуществление соответствующего процесса эксплуатации и условий его протекания. Поэтому классификация изделий должна содержать в качестве классификационных признаков сначала служебное назначение, а затем характеристики конструкции.

С помощью такой классификации потребитель выбирает соответствующее изделие. Например, машины для транспортировки груза

должны классифицироваться по виду процесса транспортировки (наземный, воздушный, водный), по массе транспортируемого груза, по дальности транспортировки груза и далее по конструктивному решению.

На этапе изготовления классификация изделий необходима для выбора методов изготовления изделия, технологического оборудования. В этом случае в качестве классификационных признаков выступают характеристики конструкции изделия, непосредственно связанные с технологией его изготовления.

Для этапа утилизации изделий нужна их классификация, где в качестве классификационных признаков выступают характеристики конструкции изделия, связанные непосредственно с технологией утилизации.

Знакомство с классификациями изделий показало практическое отсутствие классификаций изделий, как объектов изготовления и утилизации. Поэтому анализу были подвергнуты изделия как объекты эксплуатации.

В задачу анализа классификаций изделий входило установить методический подход к построению классификации различных изделий: применяемые методы классификации; характеристики изделий, принимаемые в качестве классификационных признаков; глубина классификаций.

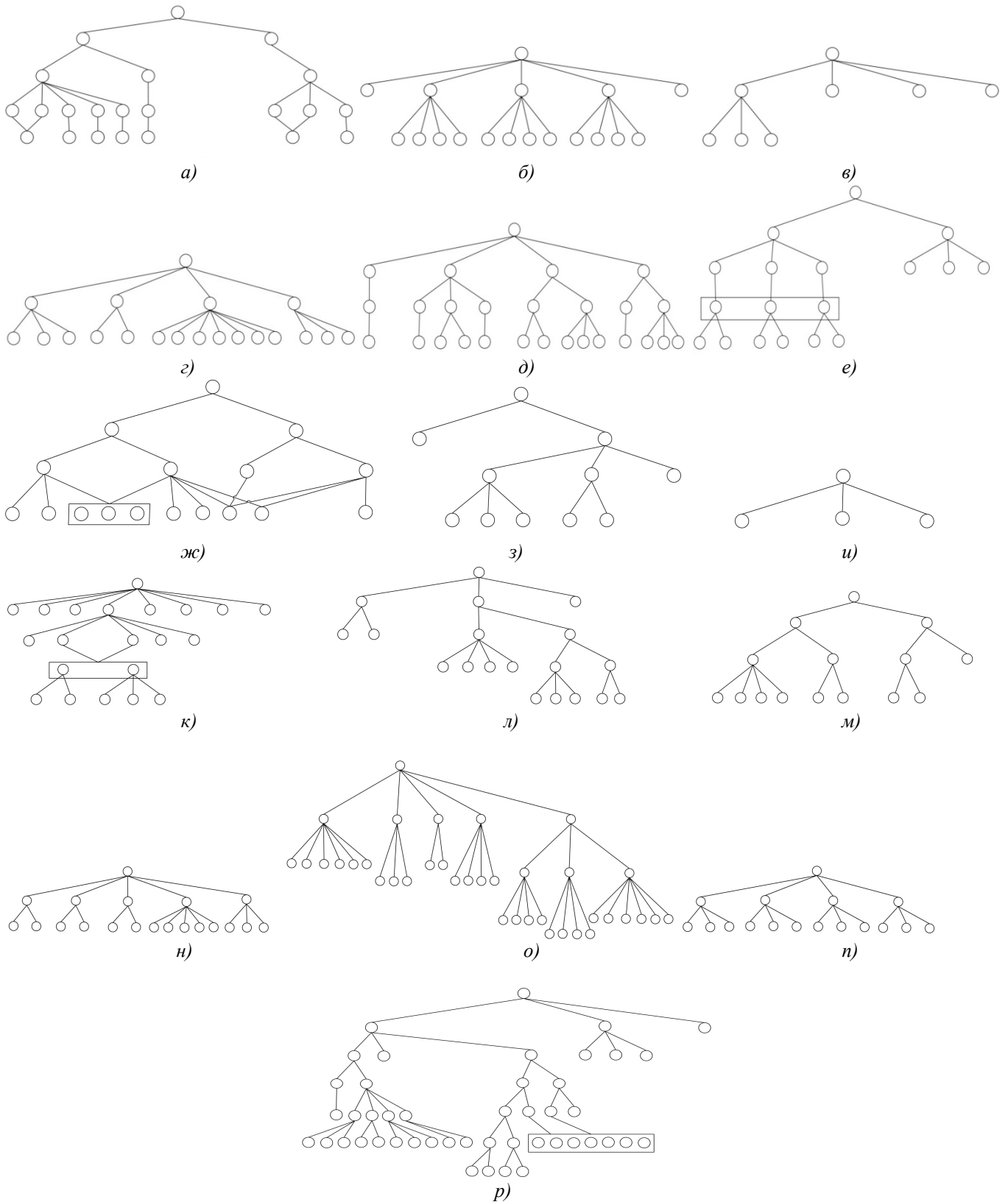


Рис.1. Классификации изделий:

a – машины для мойки тары; *б* – легковые автомобили; *в* – холодильные машины; *г* – грузоподъемные машины; *д* – трикотажные машины; *е* – подвижной состав; *жс* – электрические машины; *з* – гидравлические машины; *и* – подъемно-транспортные машины; *к* – краны; *л* – компрессорные машины; *м* – насосы; *н* – строительные машины и механизмы; *о* – машины для уплотнения и стабилизации балласта, выправки и отделки пути; *п* – машины для приготовления цементобетонных смесей; *р* – автомобили

В классификациях широкое применение нашли два метода классификации объектов – иерархический и фасетный.

Иерархический метод классификации – это метод, при котором заданное множество объектов последовательно делится на подчиненные подмножества, постепенно конкретизируя объект классификации. При этом основанием деления на подмножества служит выбранный признак.

Фасетный метод классификации подразумевает параллельное разделение множества объектов на независимые классификационные группировки. При этом не предполагается жесткой классификационной структуры и заранее построенных конечных группировок. Классификационные группировки образуются путем комбинации значений, взятых из соответствующих фасетов.

Что касается глубины классификации, то она характеризуется числом классификационных признаков. Чем меньше число классификационных признаков, тем менее подробно описывается множество объектов, тем меньше эффект применения классификации.

Принимая во внимание изложенное, был проведен анализ общих классификаций машин и изделий разных подотраслей таких, как машины для мойки тары, легковые автомобили,

холодильные машины, грузоподъемные машины, трикотажные машины, подвижной состав, электрические машины, гидравлические машины, подъемно-транспортные машины, краны, компрессорные машины, насосы, строительные машины и механизмы, машины для уплотнения и стабилизации балласта, выправки и отделки пути, машины для приготовления цементобетонных смесей, автомобили.

В процессе анализа классификаций определялись методы классификации, число уровней в классификациях и структура классификации (рис.1).

Результаты анализа приведены в табл. 1, по которым можно отметить следующее.

В классификациях применяются разные методы: иерархический, фасетный и смешанный, когда изделия делятся на уровни, как в иерархическом методе, а на одном уровне изделия делятся по разным признакам, как при фасетном методе.

Например, на рис.2 показана общая классификация машин [1].

По внешнему виду можно считать, что применен иерархический метод классификации. Однако как на первом, так и на втором уровне классификации, машины делятся по разным признакам.

1. Характеристики классификаций изделий

№ п/п	Изделие	Метод классификации			Количество уровней
		Иерархический метод		Смешанный метод (иерархический и фасетный)	
		Полный	Усеченный		
1	Машины для мойки тары	+		+	4
2	Легковые автомобили		+	+	2
3	Холодильные машины		+		2
4	Грузоподъемные машины	+		+	2
5	Трикотажные машины	+			4
6	Подвижной состав		+	+	3
7	Электрические машины	+		+	3
8	Гидравлические машины		+		3
9	Подъемно-транспортные машины	+			1
10	Краны		+	+	4
11	Компрессорные машины		+		4
12	Насосы		+	+	3
13	Строительные машины и механизмы	+		+	2
14	Машины для уплотнения и стабилизации балласта, выправки и отделки пути		+	+	2
15	Машины для приготовления цементобетонных смесей	+		+	2
16	Автомобили		+	+	6

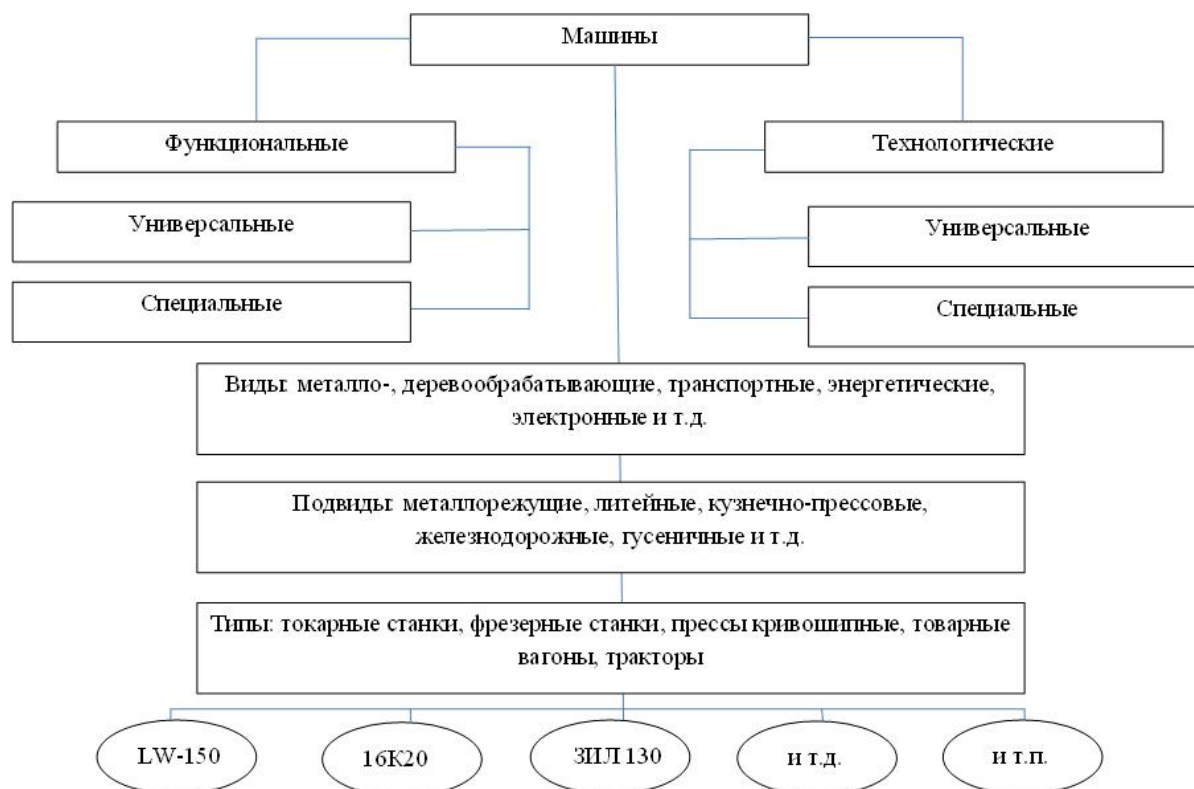


Рис. 2. Общая классификация машин

На первом уровне изделия делятся на функциональные и технологические, и в то же время – на виды металлорежущих станков и деревообрабатывающих станков.

На втором уровне машины подразделяются по разным признакам: по уровню специализации – универсальные, специальные и на подвиды машин.

В отличие от этой классификации в трудах акад. И.И. Артоболевского [2] приводится общая классификация машин на основе иерархического метода, где машины делятся по функциональному признаку: энергетические (двигатели, генераторы); рабочие (транспортные, технологические); информационные (контрольно-управляющие, математические); кибернетические. Однако эта классификация содержит только два уровня.

В классификации легковых автомобилей тоже наблюдается смешение иерархического и фасетного методов классификации.

Так, на первом уровне автомобили делятся на специальные, универсальные и, одновременно, на пассажирские, спортивные и премиум класса.

На втором уровне универсальные автомобили делятся на автомобили повышенной проходимости, повышенной вместительности и одновременно на седаны и легковые.

В результате оказалось нарушенным основ-

ное правило иерархической классификации – распределение объектов на одном уровне по одному признаку.

При этом в одних случаях разные признаки отражают назначение изделия, как объекта эксплуатации, а в других случаях отражают характеристики конструкции изделия.

Например, в классификации грузоподъемных машин на втором уровне подъемные машины делятся на грузовые и грузопассажирские, а домкраты делятся на гидравлические, винтовые, реечные.

Приведенные на рис.1 структуры классификаций всех изделий показывают, что они соответствуют иерархическому методу. Среди них 7 имеют полную структуру, а 9 – усеченную структуру.

Что касается фасетного метода, то он находит отражение на некоторых уровнях 11-ти классификаций.

На основе проведенного анализа классификаций можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствует единый методический подход в построении классификаций; классификации различаются применением разных методов классификации, структурой и недостаточной глубиной. В частности недостаточно глубоко разработана общая классификация машин и некоторые другие.

2. Деление изделий в классификациях в ос-

новом осуществляется по функциональным признакам при отсутствии характеристик конструкции.

3. В некоторых классификациях нарушены правила классификации.

Отмеченные недостатки классификаций препятствуют формированию общего представления о разнообразии изделий, определению направлений дальнейшего развития изделий.

Отсутствие в классификациях в качестве отличительных признаков характеристик конструкции изделий препятствует заимствованию конструкторских решений при создании новых изделий. Это приводит к дублированию разработок, препятствует расширению специализированных производств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интернет ресурс <http://www.myshared.ru/slide/233710/>
2. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. 1988, – 640 с.

REFERENCES

1. Internet Resource <http://www.myshared.ru/slide/233710/>
2. Artobolevsky, I.I. *Theory of Machines and Mechanisms: Textbook for Technical Colleges. 4-th Edition revised and supplemented* – М.: Science. 1988, – pp. 640.

Рецензент д.т.н. А.Н. Михайлов

УДК 621.9.02

DOI: 10.12737/article_595256f1d4d6d1.51942913

В.Ф. Макаров, д.т.н.

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614600, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)

E-mail: makarovv@pstu.ru

Разработка и применение новых инновационных технологий при производстве современных газотурбинных двигателей

Приведены результаты научно-исследовательских работ, проведенных совместно с ОАО «Пермский моторный завод» и ОАО «Авиадвигатель» по исследованию, разработке и внедрению новых инновационных технологических процессов изготовления ответственных деталей современных и перспективных ГТД типа ПС90 2А, ПД14, ПД35 с целью повышения производительности, качества и долговечности их работы.

Ключевые слова: диски; лопатки; резьба; скоростное протягивание; глубинное шлифование; полирование; упрочнение; балансировка; качество; усталостная прочность.

V.F. Makarov, D.Eng.

(Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614600, Russia)

Development and application of new innovation technologies in manufacturing modern gas turbine engine

The results of scientific research works carried out jointly with OC “Perm Motor Works” and OC “Aviation Engine” on investigations, development and application of new innovation technological processes of the critical parts production for modern and future-technology gas turbine engines (GTE) of types PS90 2A, PD14, PD35 with the purpose to increase productivity, quality and life of their operation are shown.

Keywords: disks; blades; thread; speed drawing; deep grinding; burnishing; strengthening; balancing; quality; fatigue resistance.

Более высокие эксплуатационные показатели новых газотурбинных двигателей типа

ПС90 2А, ПД14, ПД35 по сравнению с ранее выпускаемыми изделиями достигнуты за счет применения новых жаропрочных материалов, еще более труднообрабатываемых резанием, а также за счет значительного усложнения конструкции деталей. Трудоемкость обработки таких деталей существенно увеличилась.

Для решения задач по снижению трудоемкости и обеспечению требуемого качества и их надежности проводятся работы по исследованию, разработке и внедрению таких высокопроизводительных технологических процессов, как скоростное протягивание, растровое фрезерование, многоосевое глубинное шлифование, тонкое прецизионное ленточное полирование, автоматизированное размерное скругление острых кромок, высокоскоростная совмещенная лазерно-электроэрозионная прошивка отверстий малых диаметров, и других технологических процессов с широким использованием современных достижений в области числового компьютерного управления станками и обрабатывающими центрами.

Оптимизация процессов лезвийной обработки. Совершенствование методов лезвийной обработки деталей ГТД – точение, фрезерование, сверление, протягивание – традиционно проводится по хорошо зарекомендовавшей себя методике проф. А.Д. Макарова [1] на базе оптимизации режимов резания по минимуму относительно установившегося износа при соответствующей оптимальной температуре контакта (резания). Эта методика позволяет быстро, надежно и достоверно определять экспериментально и теоретически оптимальные режимы практически для любого вида лезвийной обработки новых труднообрабатываемых материалов с применением новых видов режущего инструмента.

Эффективность такого подхода доказана при разработке и внедрении впервые в отрасли метода *скоростного протягивания деталей ГТД на оптимальных режимах резания*. Одна из острых проблем повышения производительности и качества процесса протягивания сложнофасонных замковых поверхностей дисков и лопаток газотурбинных двигателей решается путем применения метода скоростного протягивания твердосплавными протяжками на новых горизонтально-протяжных станках с ЧПУ с большой длиной хода, типа RAWM16/8500 фирмы Hoffmann (Германия).

Проведено комплексное исследование процесса протягивания более 30 марок обрабатываемых жаропрочных сталей и сплавов с при-

менением как быстрорежущих, так и твердосплавных протяжек в диапазоне скоростей резания 0,5...70 м/мин с подачами от 0,005 до 0,15 мм/зуб.

Теоретической основой применения скоростного протягивания твердосплавными протяжками явилось установление оптимальных температурных зон в процессе резания, при которых наблюдалось существенное снижение износа протяжек, сил резания и усадки стружки [2]. Физическая природа этого явления выяснилась при проведении высокотемпературных механических испытаний образцов обрабатываемых материалов на растяжение. Установлено, что при определенной температуре испытаний (например, 700 °С для жаропрочного деформируемого сплава на железо-никелевой основе ЭИ787ВД) наблюдается снижение пластических свойств сплава – явление провала пластичности материала (минимум относительного сужения ψ и удлинения δ при значительном снижении его прочностных свойств σ_b).

В результате установлено, что минимальная интенсивность износа протяжек наблюдалась при различных оптимальных скоростях резания v_0 для различных подач на зуб S_z , но при одной и той же оптимальной температуре резания $T_0 = 700$ °С, совпадающей с температурой провала пластичности $T_{пп}$. Аналогичные результаты экспериментальных исследований получены и для других жаропрочных сталей и сплавов. Эмпирические зависимости оптимальных параметров резания v_0 , θ_0 , $h_{03л}$ в зависимости от процентного содержания углерода С, алюминия Al, предела прочности σ_b , (γ') – фазы, подачи на зуб S_z для различных групп обрабатываемых материалов представлены в таблице.

На основании проведенных исследований предложен новый метод скоростного протягивания на станке с ЧПУ с переключением скорости резания до оптимального значения на каждой секции протяжек по ходу движения многосекционного блока протяжек (рис.1).

В результате в процессе протягивания елочного паза диска турбины по мере движения блока протяжек и при соответствующем снижении подачи на зубьях с 0,1 до 0,02 мм/зуб скорость резания не снижается, как обычно при традиционном протягивании, а, наоборот, повышается с 17 до 27 м/мин, обеспечивая повышение производительности в 9 раз, улучшение параметров качества поверхностного слоя и более высокую усталостную прочность дисков.

Эмпирические зависимости оптимальных параметров резания

Группа обрабатываемых материалов	Инструментальный материал	Оптимальная скорость резания v_o , м/с	Оптимальная температура резания θ_o , °К	Оптимальная интенсивность износа, $h_{озл}$, мкм/м
1. Нержавеющие стали	P18	$32 \cdot C^{-0,2} S^{0,48} z^{-1} \cdot 10^{-3}$	$1100 \cdot C^{0,1}$	$305 \cdot C^{1,68} S^{2,36} z^{-1} \cdot 10^3$
2. Титановые сплавы	P18	$4,35 \cdot \sigma^{-0,2} b Al^{-1,7} S^{-0,5} z^{-0,5}$	$16,2 \cdot \sigma^{-0,42} b Al^{0,54}$	$0,01 \cdot \sigma^{0,32} b Al^{2,51} S^{0,62} z^{-0,5}$
	BK8	$12,6 \cdot \sigma^{-0,23} b Al^{-1,7} S^{-0,47} z^{-0,5}$		$0,002 \cdot \sigma^{0,4} b Al^{1,7} S^{0,5} z^{-0,5}$
3. Жаропрочные деформированные сплавы	BK8	$0,98 \cdot (\gamma')^{-0,62} S^{-0,3} z^{-0,3}$	$570 \cdot (\gamma')^{0,1} + 273$	$4,36 \cdot (\gamma')^{1,4} S^{1,3} z^{-1}$
4. Жаропрочные литейные	BK8	$0,98 \cdot (\gamma')^{-0,62} S^{-0,3} z^{-0,13} \sigma^{0,14} b_0$		$5,6 \cdot (\gamma')^{1,4} S^{1,3} z^{-1} \sigma^{0,14} b_0$



Рис. 1. Изменение скорости резания в процессе протягивания елочных пазов в дисках турбины из сплава ЭИ787ВД многосекционными твердосплавными протяжками

Созданная теория оптимального резания при протягивании применена для разработки методики проектирования и применения впервые в отрасли новых конструкций сборных протяжек с механическим креплением непереключаемых твердосплавных пластинок вместо быстрорежущих и напайных твердосплавных конструкций для скоростного протягивания замков лопаток компрессора ГТД на оптимальных скоростях резания (рис. 2).

Методика проектирования и расчета параметров новых протяжек разработана [3] с учетом изменения силы резания, процесса стружкообразования, применения принципа равной стойкости чистовой, получистовой и черновой секций протяжек при скоростном протягивании замков лопаток из жаропрочных сплавов различных групп обрабатываемости типа титанового сплава BT8M, железоникелевого деформируемого сплава ЭИ787ВД и литейного никелевого сплава ВЖЛ14 на оптимальных скоростях резания для черновых, получистовых и чистовых протяжек. Применение протяжек сборной конструкции позволяет в 1,5 – 2 раза повысить стойкость, надежность и стабильность работы протяжек при скоростном

протягивании замков лопаток компрессора ГТД.

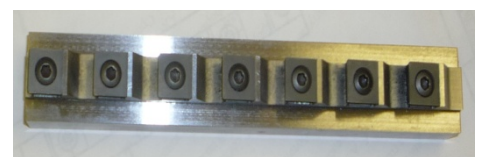
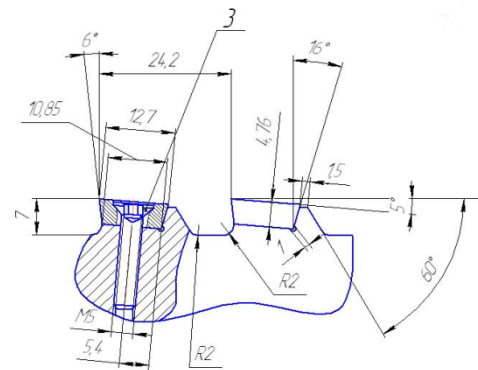


Рис. 2. Схема крепления многогранной сменной пластинки на корпусе протяжки и общий вид сборной протяжки для обработки замка лопатки

Решение проблемы обработки точных плоскостей в труднодоступных местах глубоких карманов корпусов специзделий решена путем разработки и применения **метода растрового прецизионного фрезерования на станке с ЧПУ**. При обработке таких поверхностей возникают технологические сложности, вызванные большим вылетом инструмента и конструктивными особенностями корпуса. Существующая технология ручной доводки не позволяет стабильно получать необходимые отклонение от плоскостности 0,01 мм и параметр шероховатости поверхности $Ra \leq 0,63$ мкм.

В процессе обработки плоскости с использованием специально разработанной программой ЧПУ многоосевого станка обеспечивается траектория перемещения фрезы по фигуре Лиссажу [4]. Многообразие фигур и математический расчет позволяет запрограммировать

траекторию, перемещение инструмента по которой обеспечит требуемые параметры качества поверхности. Впервые выявлено, что на отклонение от плоскостности и параметр Ra шероховатости поверхности влияют такие параметры растровой траектории, как угол наклона и плотность сетки полученной траектории.

Анализ экспериментальных исследований показал, что эти зависимости носят экстремальный характер и наилучшее сочетание по производительности и требуемым параметрам качества поверхности можно достичь при угле наклона сетки $\gamma = 90^\circ \pm 10^\circ$, плотности сетки $q = 30..50\%$ от диаметра инструмента. В результате внедрения нового процесса финишной обработки плоских поверхностей глубоких пазов, на станках с ЧПУ обеспечивается стабильная шероховатость $Ra < 0,8$ мкм и отклонение от плоскостности $\Delta < 0,05$ мм, устранен тяжёлый ручной труд, а производительность повысилась более чем в 3 раза.

Ускоренный выбор оптимальных режимов лезвийной обработки для различных деталей ГТД сегодня невозможен без применения *методов диагностики процесса резания*. На вновь созданном компьютерном центре диагностики проведены исследования влияния геометрии, материала режущих пластинок и износа резцов различных фирм и режимов резания на такие физические параметры процесса резания, как силы резания, температура, шум и вибрация, мощность резания, а также на шероховатость обработанной поверхности при точении. Проведена сравнительная оценка и даны рекомендации по ускоренному выбору и использованию режущих пластинок в зависимости от типа обработки различных сталей и композиционных материалов [5].

Установлена возможность полного импортозамещения режущего инструмента при обработке деталей ГТД на оптимальных режимах резания. Проведены исследования возможности адаптивного управления процессом фрезерования при обработке профиля пера титановых лопаток по силе резания. Повышена производительности обработки при этом на 15...20%.

Проблемы обработки композиционных материалов. В процессе механической обработки при воздействии режущего инструмента образуются значительные дефекты поверхностного слоя деталей: грубая недопустимая шероховатость; большая волнистость; вырывы и сколы на поверхности; ворсистость, расслоения, деламинация; глубокие трещины; откло-

нение формы и взаимного расположения поверхностей и др. Кроме того, при механической обработке резанием наблюдается повышенный износ режущих кромок инструментов и истирание по задней поверхности вследствие высокой твердости наполнителя и его абразивного воздействия на режущий инструмент, высоких прочностных характеристик композиционных материалов, а также слоистости структуры, низкой теплопроводности композитов, высоких упругих свойств композиционных материалов. В связи с этим, проведены исследования по резанию ПКМ гидроабразивным методом на установке гидроабразивной резки и на лазерной установке с охлаждением зоны резания азотом в сравнении с различными методами лезвийной обработки.

В результате анализа обработки *методом гидроабразивного резания (ГАР)* деталей из ПКМ установлено, что по сравнению с лезвийной обработкой имеются следующие преимущества: на образцах деталей полностью отсутствуют сколы, вырывы армирующего волокна и трещины на торцах; полностью исчезло выделение токсичных веществ; отсутствует износ режущего инструмента; отсутствуют оплавленные участки связующего из-за низкой температуры в зоне резания; появилась возможность качественно обрабатывать ПКМ с металлическими армирующими наполнителями; при получении отверстий полностью исчез дефект отслоения; повысилась производительность процесса обработки в 1,5 раза.

К недостаткам процесса ГАР можно отнести следующие: возможность применения только ограниченную номенклатуру деталей по размерам и форме; невозможность обработки глухих отверстий; опасность насыщения композита водой с последующим расслоением препрегов при сушке.

При сравнении обработки деталей из ПКМ на лазерной установке с охлаждением зоны резания азотом с механической обработкой установлено, что при лазерной резке полностью отсутствуют сколы, вырывы армирующего волокна и трещины на торцах, исчез дефект отслоения, отсутствует износ режущего инструмента, имеется возможность обрабатывать ПКМ с металлическими армирующими наполнителями. При этом производительность процесса обработки выше в 1,7 раза.

В тоже время имеется ряд недостатков: выделение токсичных веществ (требуется применение вентиляции); остаются оплавленные участки с подтеками связующего на выходе

отверстия, что обусловлено высокой температурой в зоне резания; возможна обработка только ограниченной номенклатуры деталей; невозможность обработки глухих отверстий.

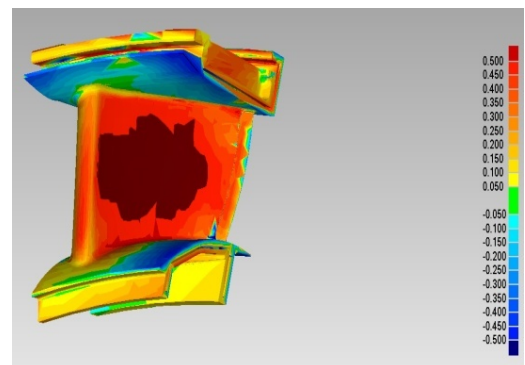
По результатам этих исследований можно сделать вывод, что заменить механическую обработку на ГАР или лазерную обработку для многих деталей ГТД из композиционных материалов невозможно. Однако становится ясно, что для качественной обработки композитов механическими методами необходимо обеспечить сверхвысокую скорость резания, весьма острую режущую кромку, микронную подачу и глубину резания. Скорость резания должна опережать скорость деформационных процессов, происходящих в структуре высокопрочной матрицы и хрупкой полимерной связки. Необходимо работать над созданием процесса сверхскоростного микрорезания, например, ультразвуковое вибросверление специальными сверлами с алмазным покрытием.

Технологическое обеспечение высокой точности изготовления сопловых лопаток турбин при глубинном многоосевом шлифовании на станке с ЧПУ. Для обеспечения высокого КПД и требуемой тяги газотурбинного двигателя конструкторами рассчитывается величина эффективной площади межлопаточного проходного сечения соплового аппарата. При сборке соплового аппарата точность проходного сечения зависит от точности изготовления литейных поверхностей профиля лопаток и точности базовых установочных поверхностей каждой индивидуальной сопловой лопатки. Существующая прежде технология шлифования базовых поверхностей лопаток на универсальных шлифовальных и модернизированных лоботокарных станках не учитывала погрешности литья лопаток. В результате требовалась длительная доработка и подгонка лопаток для обеспечения параметров проходного сечения.

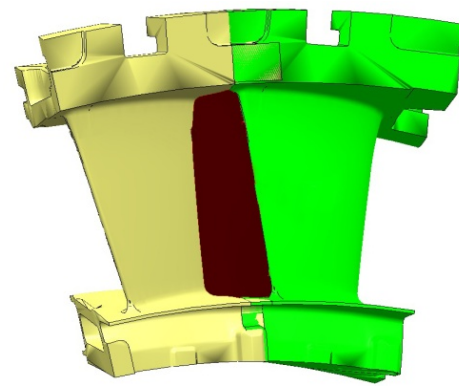
Для решения вышеприведенных задач приобретен специальный профилировальный 5-ти осевой станок с ЧПУ Siemens Sinumerik 840D модели MFP-050.65.65 фирмы «Magerle AG» (Швейцария). Имеющиеся на станке большие возможности системы ЧПУ позволяют решить эту задачу. Для этого разработана методика и комплекс программного обеспечения (ПО) подготовки данных для шлифования лопаток, который включает в себя специализированное программное обеспечение (СПО) для автоматизированного расчета величин смещения и углов поворота сопловых и

рабочих лопаток [6]. В данном СПО разработан автоматический процесс получения величин компенсации смещения и углов поворота, который включает в себя пакетную обработку по результатам оцифровки комплекта лопаток.

Для того чтобы произвести механическую обработку, в первую очередь, необходимо правильно установить заготовку, т.е. придать ей правильное положение относительно выбранной системы координат по шести базовым литейным точкам. Однако, на практике, при таком варианте базирования сопловых лопаток на их проточных частях возможно появление искаженной геометрии по сравнению с эталоном, что связано с погрешностью литья отливок (рис. 3, а).



а)



б)

Рис. 3. Расчет СПО погрешности литья (темное пятно) на проточной части сопловой лопатки (а) и построение поверхности для вычисления площади проходного сечения (б)

С учетом величины этой площади вычисляется угол, на который необходимо повернуть лопатку относительно собственной оси так, чтобы площадь проходного сечения находилась в заданном допуске. В СПО заложена возможность анализа наличия или отсутствия припуска на механическую обработку.

Технолог может задать необходимую величину припуска на обрабатываемые поверхно-

сти, и СПО учтет эти данные в процессе со-
вмещения. В результате внедрения новой тех-
нологии совместного использования совре-
менного оборудования и СПО, помимо повы-
шения производительности производства со-
пловых лопаток в 2,5 раза, значительно повы-
силась точность проходного сечения, суще-
ственно уменьшился разброс значений площади
проходного сечения в сопловом аппарате и,
как следствие, повысился КПД двигателя,
снизилась вероятность появления нежела-
тельных вибраций ГТД, что очень важно для
повышения конкурентоспособности вновь
выпускаемых изделий.

**Комбинированное зубошлифование – зу-
бополирование.** На АО «Редуктор-ПМ» по-
ставлена задача повышения эффективности и
качества обработки зубчатых колес совре-
менных редукторов и ГТД на основе применения
новой передовой технологии шлифовально-
полировальной обработки с применением
сборных червячных шлифовально-
полировальных кругов вместо применения
весьма трудоемкой операции алмазного зубо-
хонингования. Выполнен подбор режимов и
тестовая обработка зубчатых колес с анализом
точности и шероховатости поверхностей зубь-
ев шестерен после комбинированной шлифо-
вально-полировальной операции с приме-
нением комбинированных шлифовально-
полировальных червячных кругов.

Одна часть круга в осевом направлении
предназначена для предварительного шлифо-
вания, а вторая часть круга – для окончатель-
ной финишной полировальной обработки
(рис. 4). Первая черновая часть круга имеет
более крупное абразивное зерно и
керамическую связку, а вторая чистовая часть
сборного круга имеет абразивные зерна
меньшего размера и более мягкую
полиуретановую связку.

В результате экспериментальных исследо-
ваний установлено, что процесс зубошлифо-
вания комбинированными шлифовально-
полировальными кругами позволяет достичь
требуемых параметров точности (3 – 4 сте-
пень) и шероховатости поверхности профилей
зубьев зубчатых колес $Ra \leq 0,16$ мкм, что со-
ответствует требованиям ТТ и КД. Внедрение
комбинированной чистовой обработки сбор-
ными шлифовально-полировальными кругами
обеспечивает повышение производительности
чистовой обработки в 2 раза за счет ликвида-
ции операции алмазного зубохонингования.
Одновременно решается вопрос импортоза-
мещения украинских алмазных хонов на оте-

чественные шлифовально-полировальные
круги завода Ильич (г. С.-Петербург), высво-
бождения зубохонинговальных станков и об-
служивающего персонала.

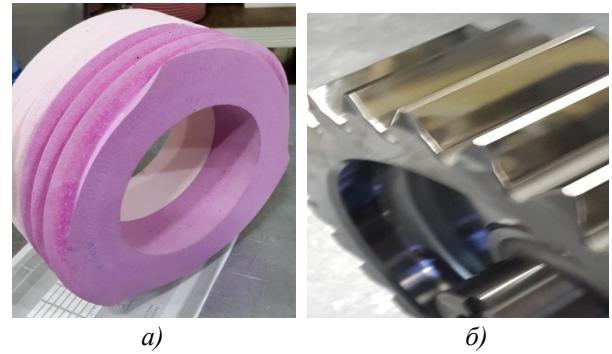


Рис. 4. Общий вид комбинированных шлифовально-
полировальных червячных кругов (а) и поверхно-
стей цилиндрических зубчатых колес после комби-
нированного шлифования (б)

**Автоматизация скругления сложнопро-
фильных кромок деталей ГТД вращающи-
мися гибкими полимерноабразивными
щетками.** В процессе любой механической
обработки различных деталей образуются или
острые кромки или заусенцы. Чаще всего ост-
рые кромки и заусенцы на деталях не допус-
каются по требованиям чертежа. Надежность
работы машины обеспечивается снятием фа-
сок, округлением и полированием кромок. В
результате этого достигается снижение кон-
центрации напряжений на кромках и повыше-
ние усталостной прочности деталей машин.

В большинстве случаев обработка кромок
деталей проводится вручную с применением
различных слесарных инструментов и приспособлений.
Поставлена задача автоматизиро-
вать скругление профильных острых кромок
на деталях ГТД. Для решения этой задачи
проведены комплексные исследования по тео-
рии и практике применения обработки поли-
мерноабразивными щетками, разработаны
специальные агрегатные шлифовальные уста-
новки (патент №79066) (рис. 5).

В результате внедрения технологии скруг-
ления и полирования кромок пазов дисков
турбин абразивно-полимерными щетками по-
высились производительность, качество и
стабильность обработки кромок [7]. Так, при
ручном скруглении на обработку диска требо-
валось 8 ч работы. После автоматизации обра-
ботка диска занимает 2 ч, отсутствует грани-
чность профиля и риски на поверхности скруг-
ления.

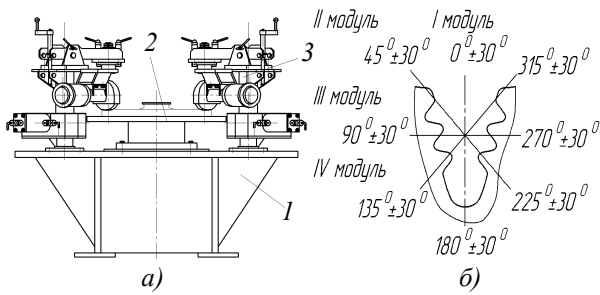


Рис. 5. Схема агрегатного четырехмодульного станка (а) и направления обработки кромок торцевых поверхностей елочного паза диска турбины шлифовальными головками с полимерноабразивными щетками (б)

Применение методов упрочняющей обработки. В процессе исследований причин разрушения деталей в эксплуатации и при усталостных испытаниях установлено, что в процессе механической обработки профильных поверхностей различных деталей на сопряженных поверхностях профиля формируются различные параметры качества поверхностного слоя – шероховатость, остаточные напряжения, микроструктура. В результате в переходных поверхностях профиля к конструкторскому концентратору напряжений добавляется технологический концентратор напряжений, что увеличивает вероятность появления усталостных трещин при знакопеременных нагрузках и приводит к последующему разрушению деталей.

Такие разрушения выявлены при эксплуатации и усталостных испытаниях зубчатых колес ГТД, конических крупномодульных резьб, елочных замков турбинных лопаток, ступенчатых валов, испытывающих высокие знакопеременные или циклические изгибные крутящие температурные нагрузки [8].

Оценка пооперационного формирования остаточных напряжений поверхностных слоев во впадине и на боковой поверхности шестерни, сделанная на основе анализа производственного опыта и расчета величины и характера распределения по данным научных исследований, позволяет сделать вывод о том, что в переходной зоне формируются дополнительный технологический концентратор напряжений (ТКН), обусловленный резким переходом растягивающих остаточных напряжений от +200 МПа на боковой поверхности зуба до высоких сжимающих остаточных напряжений -700 МПа на дне впадины зуба.

Выдвинута гипотеза: снижение действия технологического концентратора напряжений в критической переходной зоне возможно пу-

тем выравнивания напряжений за счет введения дополнительной финишной операции локального упрочнения впадины зуба методом поверхностно-пластического деформирования.

Применение наиболее рационального метода – обработки дробью способствует снижению величин градиентов основных параметров качества поверхностного слоя и формированию благоприятных сжимающих остаточных напряжений с необходимой величиной и распределением по глубине в области смежных поверхностей зуба. В результате проведенных усталостных испытаний установлено, что применение локального направленного упрочнения дробью переходных зон от впадины к боковой поверхности зубьев шестерен повышает предел выносливости на 15...20 % по сравнению с прежним серийным маршрутом обработки.

Аналогичные исследования проведены при разработке методики назначения оптимальных режимов глубинного шлифования елочных профилей турбинных лопаток. Для выполнения елочного профиля на замке лопатки применяется профильная схема врезного многопроходного глубинного шлифования с постепенным снятием припуска глубиной по первой впадине елочного профиля замка до 5 – 6 мм (рис. 6).

При шлифовании дна впадины длина дуги и площадь контакта периферии круга в несколько раз меньше, чем при шлифовании боковых поверхностей торцем круга. Вследствие увеличения длины дуги контакта длительность воздействия абразивных зерен на металл возрастает. Все это приводит к большему увеличению температуры шлифования на торцевых поверхностях, чем на дне впадины и росту растягивающих остаточных напряжений. Возникает технологический концентратор напряжений в переходной радиусной зоне.

При действии знакопеременных нагрузок в условиях эксплуатации этот концентратор напряжений складывается с циклически возникающим конструктивным геометрическим концентратором напряжений и создает условия для образования усталостных трещин в критической радиусной переходной зоне и разрушения лопаток турбины. Для снижения действия этого технологического концентратора напряжений и повышения сопротивления усталости после обработки глубинным шлифованием предложено применять процесс упрочнения профиля хвостовика микрошариками на пневмодробеструйной установке.

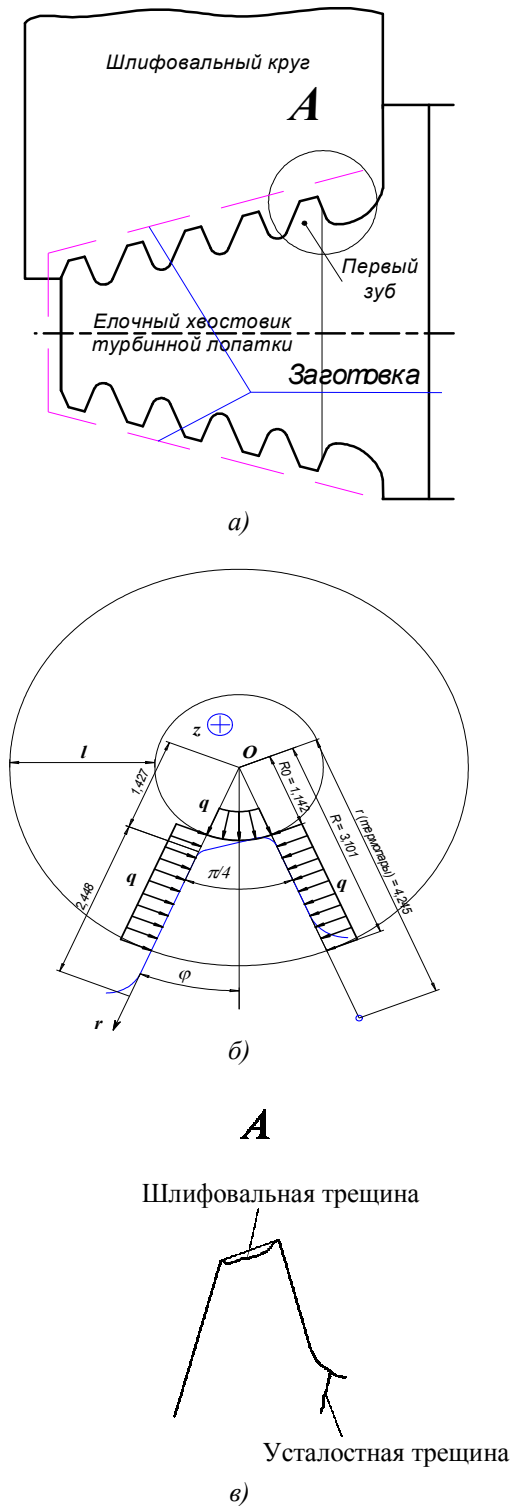


Рис. 6. Схема глубинного шлифования елочного замка (а, в), схема действия тепловых источников при глубинном шлифовании первой впадины елочного профиля хвостовика турбинной лопатки (б)

В результате проведения дробеструйного упрочнения микрошариками «елочного» профиля хвостовика и последующих усталостных испытаний турбинных лопаток и образцов-имитаторов «елочного» хвостовика при нормальной (20 °С) и рабочей (650...700 °С) тем-

пературах установлено, что предел выносливости после упрочнения повышается на 20...25 % при испытании с нормальной температурой, а при испытании на рабочей температуре происходит увеличение на 60 %.

Наличие технологических концентраторов напряжений установлено при нарезании крупномодульных конических резьб, которые в эксплуатации испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий, что приводит к нередким случаям поломки труб по резьбовым соединениям [9]. Анализ мест разрушения показал, что разрушение резьб носит усталостный характер и начинается рост усталостных трещин в зоне впадины резьбы.

Изготовление конической резьбы проводится методом врезного профильного многопроходного нарезания на токарно-винторезном станке SCT 22100 с ЧПУ сборными резцами с механическим креплением специальных трехгранных профильных резьбовых пластинок. Несвободное резание радиусной вершиной резца происходит в сложных условиях трехстороннего сжатия с формированием дна впадины резьбы методом поперечного врезного точения канавок. При этом образуется деформированная вытянутая корытообразная стружка сине-зеленого цвета, что свидетельствует о высокой, порядка 500...600 °С, температуре резания.

Резание боковыми режущими кромками резца является свободным резанием с образованием широкой плоской спиральной стружки светлого цвета, что свидетельствует о значительно меньшей деформации и температуре 250...300 °С.

Полученные результаты позволяют сделать предположение, что в процессе нарезания резьбы в поверхностном слое дна впадины и на боковых поверхностях резьбы формируются различные параметры качества: шероховатость, остаточные напряжения и наклеп. Например, установлено, что на дне впадин резьбы наблюдаются более глубокие риски от режущего инструмента, чем на боковых поверхностях резьбы.

Таким образом, можно констатировать факт образования технологического концентратора напряжений в переходной зоне от дна впадины к боковой поверхности, что в условиях действия изгибных знакопеременных нагрузок и при наличии конструктивного геометрического концентратора напряжений может усиливать вероятность образования уста-

лостных трещин и последующего разрушения резьбы.

Для снижения действия технологического концентратора напряжений предложено ввести поверхностно-пластическую деформационную обработку путем обкатки предварительно нарезанной резьбы роликом. При анализе сравнительных усталостных испытаний установлено увеличение наработки обкатанного резьбового соединения над неупрочненным более чем в четыре раза, с 700 тыс. циклов до 3900 тыс. циклов.

Заключение. Таким образом, разработка и внедрение новых прогрессивных методов лезвийной, абразивной и упрочняющей обработки позволили существенно сократить трудоемкость изготовления новых двигателей при обеспечении требуемого высокого качества, надежности и долговечности работы в эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
2. Макаров, В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 440 с.
3. Макаров, В.Ф., Петухов, Г.Д. Разработка сборных конструкций протяжного инструмента для скоростного протягивания хвостовиков лопаток компрессора из труднообрабатываемых материалов // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2015. – № 10(183). – С. 23–31.
4. Макаров, В.Ф., Пепельшев, А.В. Повышение точности формы при фрезеровании плоских поверхностей в результате оптимизации параметров траектории // Справочник. Инженерный журнал. – 2015 г. – № 3 (216). – с. 6–9.
5. Макаров, В.Ф., Койнов, И.И., Абзаев, Р.С., Ширинкин, В.В., Мешкас, А.Е. Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 12(66). – С. 20–27.
6. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П., Норин, А.О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 5(59). – С. 17–24.
7. Makarov V.F., Vinogradov A.V. Automated polishing of sharp edges on gas-turbine components by abrasive polymer brushes. Russian Engineering Research New York: Allenton Press. 2012, 32, № 1, pp. 102–107.

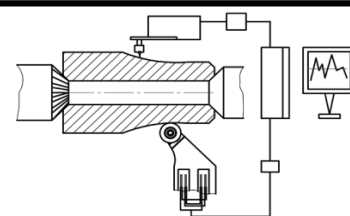
8. Макаров, В.Ф., Горбунов, А.С., Ворожцова, Н.А. Формирование параметров качества поверхностного слоя зубьев спирально-конических шестерен с учетом влияния технологической наследственности // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №4. – С. 40–47.

9. Песин, М.В., Макаров, В.Ф., Ашихмин, В.Н. Научно-обоснованное проектирование технологического процесса упрочняющей обработки резьбовой поверхности буровых труб // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 11(29). – С. 42–48.

REFERENCES

1. Makarov, A.D. *Cutting Process Optimization*. – M.: Mechanical Engineering, 1976. – pp. 278.
2. Makarov, V.F. *Optimization of Hard-to-Machine Material Drawing*: Monograph. – Staroy Oskol: TNT, 2014. – pp. 440.
3. Makarov, V.F., Petukhov, G.D. Combined structures development of drawing tool for speed drawing of hard-to-machine blade butts // *Assembly in Mechanical Engineering and Instrument Making*. – 2015. – № 10(183). – pp. 23–31.
4. Makarov, V.F., Pepelyshev, A.V. Form accuracy increase during flat surface milling as a result of path parameters optimization // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2015 г. – № 3 (216). – pp. 6–9.
5. Makarov, V.F., Koinov, I.I., Abzayev, R.S., Shirinkin, V.V., Meshkas, A.E. Diagnostics peculiarities of cutting process during composites drilling // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 12(66). – pp. 20–27.
6. Makarov, V.F., Nikitin, S.P., Norin, A.O. Quality and productivity increase during deep profile blade grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 5(59). – pp. 17–24.
7. Makarov V.F., Vinogradov A.V. Automated polishing of sharp edges on gas-turbine components by abrasive polymer brushes. Russian Engineering Research New York: Allenton Press. 2012, 32, № 1, pp. 102–107.
8. Makarov, V.F., Gorbunov, A.S., Vorozhtsova, N.A. Quality parameter formation in surface layers of spiral bevel gear teeth taking into account technological heredity impact // *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №4(34). – pp. 40–47.
9. Pesin, M.V., Makarov, V.F., Ashikhmin, V.N. Scientifically reasonable design of technological process of threaded surface strengthening in drill pipes // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – № 11(29). – pp. 42–48.

Рецензент д.т.н. А.С. Ямников



УДК 621.01: 536.75

DOI: 10.12737/article_595256f1e3d098.46148277

П.А. Витязь¹, академик,

М.Л. Хейфец², д.т.н.,

С.А. Чижик³, академик

(¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,

²ГНПО «Центр» НАН Беларуси,

³Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси)

E-mail: mlk-z@mail.ru

Состояние и перспективы развития технологических комплексов аддитивного производства изделий из композиционных материалов

Проведен анализ автоматизации и пространственно-временной интеграции производственных систем. Анализ состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства показал наметившийся переход к новой парадигме производства - «Индустрия 4.0».

Определены перспективы использования компонентов материала и потоков энергии в технологиях аддитивного производства. Рассмотрено формирование свойств композиционных материалов и изделий при аддитивном синтезе, а также модульные установки аддитивного производства.

Ключевые слова: технологические комплексы; формообразование изделий; компьютеризированное производство; аддитивные технологии; послойный синтез; синерготехнологии.

P.A. Vityaz¹, Academician,

M.L. Heifets², D. Eng.,

S.A. Chizhik³, Academician

(¹United Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus,

²SSPC "Center" of the NAS of Belarus,

³Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the NAS of Belarus)

State and outlooks in development of technological complex of additive manufacturing composite parts

The analysis of automation and special-time integration of production systems is carried out. The analysis of the state and outlooks in the development of additive technologies of computer-aided production has shown a visible transition to a new paradigm of production – "Industry – 4.0". The prospects of the application of material components and energy fluxes in the technologies of additive production are defined. Composites and products properties formation during the additive synthesis and also modular plants of additive production are considered.

Keywords: technological complexes; product shaping; computer-aided production; additive technologies; layer-by-layer synthesis; synergetic technologies.

Повышению эффективности производственной деятельности служит создание комплексов технологических, транспортных, энергетических и информационных машин на основе новых технологий и повышения производительности уже используемых.

Такая совокупность производящих машин получила название технологических комплек-

сов (ТК), которые автономно функционируют и в установленных пределах значений с использованием программного управления обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1].

Основные этапы развития технологических комплексов. Технологические комплексы в своем развитии прошли ряд этапов

(рис.1). По сравнению с универсальным станочным оборудованием 1970-х гг. компьютерно-управляемое производство начала XXI в., с приходом на рабочие места персональных компьютеров, использует компоненты искусственного интеллекта и позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [2].

С середины 1980-х гг. наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства. Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую часть, так и электронно-управляющую (построенную на основе использования компьютеров или микропроцессоров).

Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых установок, модулей, систем и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [1, 3].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны (рис.1), прежде всего, с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий [2]. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в компактное интеллектуальное производство (*CIM - Compact Intelligent Manufacture*), базирующееся на сочетании интенсивных, в том числе и аддитивных технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [3].

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечивает переход к использованию технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продукции от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, т.е. к *CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support)*. Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным комплексам компактного производства в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, обладающих единой информационной *ERP-системой (Enterprise Resource Planning)* для использования ком-

пьютерной поддержки этапов жизненного цикла продукции [1, 3].

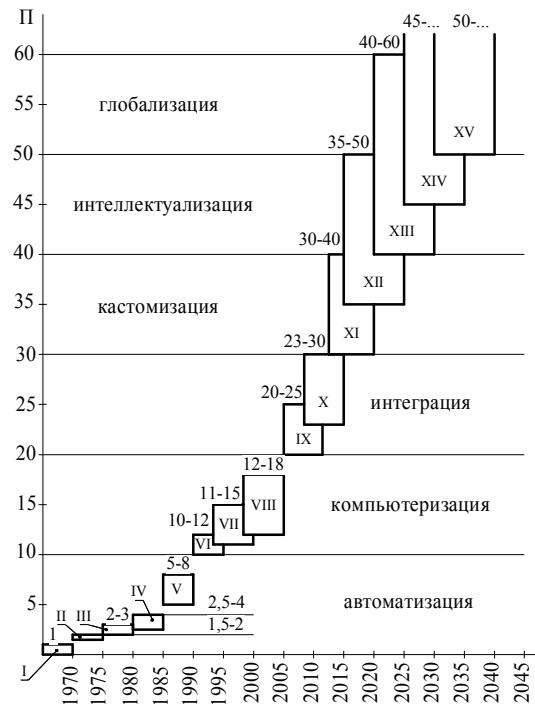


Рис. 1. Этапы развития технологических комплексов:

I – универсальное оборудование с производительностью П, принятой за 1; II – оборудование с числовым программным управлением; III – робототехнические комплексы; IV – обрабатывающие центры; V – гибкие производственные системы; VI – компьютерно-управляемое производство; VII – мехатронные технологические комплексы; VIII – компактное интеллектуальное производство; IX – компьютерное сопровождение жизненного цикла изделий; X – виртуальные предприятия; XI – аддитивное производство; XII – интернет вещей; XIII – машинное обучение; XIV – искусственный интеллект; XV – синергия технологий

Проведенный анализ возрастающей эффективности технологических комплексов показал, что после этапов пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий последуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (*AM – Additive Manufacturing*). Аддитивные технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия, обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий [4, 5].

Для производства и адресной поставки кастомизированного изделия (*custom – изготовление на заказ*), с учетом внешней и внутрен-

ней логистики предприятия (в том числе и виртуального), можно дополнить проходящие этапы прогнозом на будущее, часто связываемое с новой парадигмой производства, называемой «Индустрия 4.0». Термин «Индустрия 4.0» предложен немецкими компаниями на Ганноверской выставке технологий 2011 г. для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции», связанной с промышленным интернетом вещей (*IIoT - Industrial Internet of Things*).

В настоящее время зарождается новая эпоха производства – массовая кастомизация, характеризующаяся тем, что потребитель выступает в качестве дизайнера и инженера. Теперь по запросам потребителя можно непосредственно контролировать и управлять, а также изменять производственный процесс [6].

При системном анализе роста эффективности технологических комплексов (см. рис. 1), теперь необходимо рассчитывать не только удельную технологическую трудоемкость (себестоимость), приходящуюся на одно изделие, но и затраты по всему жизненному циклу изделия, особенно связанные с его кастомизированным маркетингом, проектированием, эксплуатацией, утилизацией и сокращением всевозможных логистических поставок.

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета, предсказанная еще в 1980-х гг. Рэймондом Курцвейлом (в настоящее время он – технический директор *Google*). Дальнейшее развитие производства аналитики связывают с машинным обучением (*ML – Machine Learning*) и искусственным интеллектом (*AI – Artificial Intelligence*). Сочетание и совместное действие робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют обеспечивать синергизм процессов производства и создавать полностью автоматизированные «цифровые фабрики» [1, 6].

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биотехнологий и медицинских технологий. По прогнозам Р.Курцвейла, зачастую просто фантастическим, в 2025 г. носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами, и уже в 2030-х гг. 3D-принтеры будут печатать новые органы, а к 2040-м гг. нанороботы – ремонтировать организм на клеточном уровне. Он предполагает, что к 2035 г. люди станут «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 г. вся планета

превратится в одну интернет-вещь, представляющую собой большой компьютер, использующий весь людской интеллект, и на повестку дня станет вопрос о человеческом бессмертии [6].

Совместное применение нано-, био- и других «оцифрованных технологий» за счет синергетических эффектов позволяет резко повысить эффективность производства, дает возможность полностью изменить предприятия и создавать на них продукцию, которой до этого не было.

Аддитивные технологии компьютеризированного производства. Нано-, био- и другие научно-технические технологии, помимо использования новых разнообразных аппаратных и программных средств, основываются на *послойном выращивании поверхностей* изделий и *самоорганизации структур* композиционного материала [7]. Так, определяя фундамент нанотехнологий, Ж.И. Алферов выделил кроме зондовой микроскопии, эпитаксиальный *рост пленок на поверхности* и процессы *самосборки гетероструктур* материала [8].

В *синергетической концепции* заложено ограничение числа состояний и правил их перехода в технологической системе [9]. Определение доминирующих процессов структурообразования при интенсивных воздействиях, целесообразно проводить с использованием понятия моды в распределениях непрерывной случайной величины контролируемого параметра. Под модой понимают такое значение параметра, при котором плотность его распределения имеет максимум. Согласно синергетической концепции устойчивые моды подстраиваются под доминирующие неустойчивые моды и в результате могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых параметров, а оставшиеся неустойчивые моды могут служить в качестве параметров порядка, определяющих процессы структурообразования.

Аддитивные и нанотехнологии реализуют провозглашенную в 1959 г. Ричардом Фейнманом новую парадигму производства, «снизу-вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху-вниз» [7]. Сущность аддитивного производства заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделий по «цифровым моделям». Создание изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [10].

В этой связи особенно перспективен подход, рассматривающий аддитивные и нанотех-

нологии как *синерготехнологии*, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений при послойном формировании структур различных материалов и управление их свойствами при разнообразных физических воздействиях [7].

Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от формируемой поверхности до источника энергии или подаваемого материала, а также позволяет в результате взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои [9].

Различают две основные группы аддитивных методов [7]: «предварительного формирования слоя» материала по технологиям *BD (Bed Deposition)*, подразумевающим наличие определенной платформы, на которой происходит «выращивание»; «непосредственное осаждение слоя» материала на сложнопрофильную поверхность по технологиям *DD (Direct Deposition)*.

На технологиях *BD*, подразумевающих наличие некоторой платформы, на которой послойно создается материал и изделие, построены «традиционные» аддитивные методы, созданные уже более 30 лет назад [11, 12].

Широко используемые в мировом производстве технологии послойного синтеза позволяют анализировать состояние и ближайшие перспективы развития методов прямого «выращивания» изделий.

1. Стереолитография. Впервые процесс стереолитографии предложен Чарлзом Хеллом в 1984 г. Технологические установки начали производиться с 1988 г. В настоящее время установки по стереолитографии производятся компанией *3D Systems Inc, USA*. Процесс основан на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения конкретной длины волны, в результате чего происходит радикальная полимеризация (т.е. отверждение полимера). Физико-механические свойства полимера ограничивают область применения стереолитографии. Чаще всего этот процесс используют в макетном проектировании, в технологии литья по выплавляемым моделям в качестве мастер-форм, эталон-моделей, он также подходит для сборки сложных моделей, при этом допустимо нанесение слоя резины или металла на модель.

2. Послойное уплотнение. Метод послойного уплотнения разработан фирмой *Cubital Inc. (Israel)* в 1987 г. Выпускается технологическое оборудование *Solider 4600* и *5600*, в котором

используются фоточувствительные к УФ-излучению полимеры. Процесс подобен фотокопированию. В результате использования фотографической маски все лишнее счищается и остается наэлектризованный порошок, отвечающий данному сечению синтезируемой модели. После того, как расплавленный материал скрепит наэлектризованный порошок, слой считается изготовленным. Аэродинамический уровень счищает излишки порошка, и материал может быть использован повторно.

3. Экструдерная заливка расплава. Послойная заливка экструдированным расплавом была предложена Скоттом Крампом. Компания *Stratasys* выпускает установки с 1991 г. Процесс включает предварительный подогрев материала, а затем – заливку расплавом. Расходный материал поступает в катушках, диаметр нити – 0,127 см. Основной частью установки является головка, через которую подается материал. Там он предварительно подогревается до температуры плавления, дозированно подается в рабочую зону и скрепляется с предыдущим слоем. В качестве материалов чаще всего используются пластики, а толщина формируемых слоев – 50...750 мкм.

4. Селективное лазерное спекание. Процесс лазерного спекания впервые предложен Карлом Декартом в 1986 г. Технологическое оборудование производится фирмой *DTM Corp.* (установки марки *Sinterstation 2000* и *2500*). Сущность SLS-процесса заключается в том, что порошковые материалы послойно спекаются лазерным излучением. Для этого нужны мелкодисперсные, термопластичные порошки с хорошей вязкостью и быстро затвердевающие, например: полимеры, воск, нейлон, керамика, металлические порошки. Корпорация *DTM* производит установки с различным числом используемых материалов: литейный воск, нейлон, поликарбонат. Развитие SLS-технологии идет по пути внедрения новых порошковых материалов, а для металлических композиционных порошков – повышения мощности лазерного излучения.

5. Создание литевой формы. Непосредственное создание литевой формы было предложено Эмануилом Сайчем из Массачусетского технологического института (*MIT*) в 1989 г. Фирмой *Soligen* для этой технологии производится технологическое оборудование. *DSPC*-процесс состоит из распределения и уплотнения слоев порошка и послойного его связывания расплавом из нагреваемой принтерной головки, сканирующей по поверхности. Несвязанный порошок вокруг модели

поддерживает и предохраняет ее от разрушения. По окончании процесса он удаляется. Созданные оболочки могут быть использованы в качестве литевых форм, которые могут включать литниковую систему для заливки металла.

б. Послойное формирование из листового материала. Послойное формирование изделий было предложено Майклом Фейгенумом в 1985 г. Промышленные технологические установки LOM 1015, LOM 2030 и др. выпускаются фирмами *Helisys, Paradigm, Sparx AB (HotPlot)*. При изготовлении изделий используется листовой материал, который раскраивается по заданному контуру лазерным или другим излучением, а затем скрепляется в стопке путем склеивания, пайки или сварки. Толщина листов зависит от материала и изменяется в интервале от 50 до 500 мкм. В настоящее время используются пластики, керамика, композиты. Метод может применяться для макетного проектирования; литья в песчаные формы; для получения гипсовых отливок; создания кремнеорганических форм в одноразовом литье.

По результатам рассмотрения наиболее используемых в настоящее время методов прямого «выращивания» изделий, можно прогнозировать ближайшие перспективы по областям потребления продуктов, изготовленных на 3D-принтерах, и оценить состояние разработок и освоения производства оборудования, средств контрольного и программного оснащения, расходных материалов для 3D-печати.

Технологические модули аддитивного производства. Изучение методов получения деталей машин без формообразующей оснастки, сравнение их преимуществ и недостатков, определение областей рационального применения синтезируемых изделий из композиционных материалов позволили выделить *три основных направления* развития методов аддитивного синтеза материалов и изделий, связанные с применением: 1) концентрированных потоков энергии в качестве источников, обеспечивающих синтез и формообразование материала и изделия; 2) различных видов и форм материала для заготовки и компонентного состава материала; 3) распределения компонентов материала и потоков энергии по поверхности и глубине обрабатываемого объекта.

Исследование современных возможностей использования концентрированных потоков энергии при формообразовании изделий (*первое направление развития*), с учетом особенностей традиционных методов создания изделий без формообразующей оснастки, позволя-

ет анализировать основные группы аддитивных методов (*BD – Bed Deposition, DD – Direct Deposition*) и выделить общие принципы построения различных технологий послойного синтеза.

Повышение качества поверхности формируемого изделия в процессах макетирования и производства (*второе направление развития*) предполагает рациональное его разбиение на слои, с учетом требуемого качества поверхности, зависящей от формы изделия. Анализ разбиения в различных методах послойного синтеза обеспечивает выбор наиболее рациональных процессов производства конкретного изделия.

Достижимость заданной точности формирования поверхностей с позиций влияния плотности мощности и направлений подачи концентрированных потоков энергии (*третье направление развития*) позволяет определить необходимые параметры источников энергии для их использования в аддитивном оборудовании.

Управлять геометрическими параметрами качества сложнопрофильной поверхности, и вносить корректировки в начальный выбор метода макетирования производства позволяют регулирование толщины формируемого слоя и его состава, разделка образуемых кромок и послойная сборка изделия [11, 12].

Технологические системы формирования изделий методом сплавления экструдированного материала позволяют реализовать возможности изменения толщины слоя, состава материала для послойного синтеза изделия с заданным пространственным распределением характеристик материала.

Модульная установка аддитивного производства, обеспечивающая создание изделий из материалов с наноразмерными добавками (такими как частицы и волокна), реализует технологические приемы по управлению теплофизическими процессами при формировании изделий из композиционных материалов (рис. 2). Контролируемое применение добавок позволяет формировать изделия, включающие структуры, имеющие различные механические, тепловые, оптические свойства и электрическую проводимость (рис. 3). Специально разработанные экструдеры обеспечивают возможность работы с материалами, имеющими температуру размягчения до 300 °С.

Существенно расширяют возможности технологических комплексов при обработке толстолистовых заготовок и обеспечивают переход к широкому применению послойного синтеза путем листового раскроя и сборки изде-

лий установки плазменной и гидроабразивной резки, оснащенные манипуляторами (рис. 4).

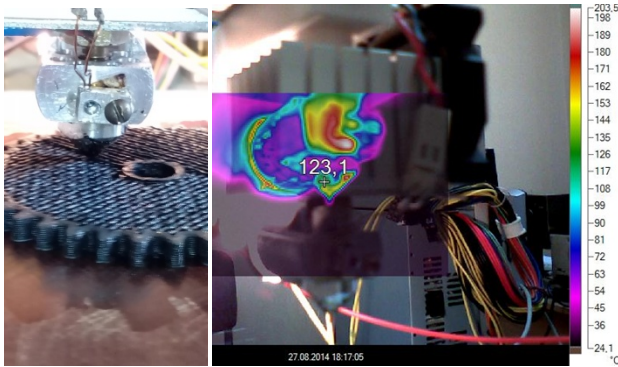


Рис. 2. Экструдерная система и термограмма процесса на FDM установке



Рис. 3. Общий вид FDM установки с закрытым и открытым кожухом



Рис. 4. Пятикоординатный манипулятор и резка под углом криволинейных поверхностей плазменной головкой

Пятикоординатный порталный манипулятор, обеспечивает резку под углом криволинейных поверхностей плазменной (или гидроабразивной) поворотной головкой и позволяет проводить разделку кромок под последующую сборку различных листовых материалов (рис. 5).



Рис. 5. Модуль технологического комплекса для плазменного раскроя и сборки изделий по LOM-технологии

Таким образом, при минимальной доработке уже на существующем, серийно выпускаемом оборудовании аддитивными методами реализуются принципы рационального достижения точности геометрической формы изделия и распределения физико-механических и других свойств его композиционного материала.

Заключение

Состояние и перспективы развития технологических комплексов позволяют говорить о новой парадигме эволюции компьютеризированного производства – «Индустрии 4.0», в которой аддитивные технологии являются ключевым звеном. Аддитивные процессы «выращивания» изделий послойным синтезом в соответствии с особенностями конструирования формируемых слоев и оболочек раскрывают новые перспективы в ресурсном проектировании деталей машин. Формируется и детализируется концепция «цифровой фабрики», включающей проектирование и управление производством и потреблением, начиная от моделирования изделия, его материалов и компонентов и заканчивая получением и эксплуатацией кастомизированного изделия.

Изучение аддитивных методов производства, определение областей рационального применения изделий, синтезируемых из компози-

ционных материалов, позволили выделить основные направления развития технологий послойного синтеза в ближайшее время. Эти направления связаны с применением концентрированных потоков энергии в качестве источников, обеспечивающих синтез и формообразование материала и изделия; различных видов и форм материала для заготовки и компонентного состава материала; распределения компонентов материала и потоков энергии по поверхности и глубине обрабатываемого объекта. Предложены и разработаны технологические модули, управляющие через подачу материалов и потоков энергии процессами послойного синтеза и сборки изделий из заготовок различных форм и материалов различного компонентного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теоретические** основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий, П.А. Витязь, М.Л. Хейфец [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 239 с.
2. **Сироткин, О.** Технологический облик России на рубеже XXI века // *Экономист*. – 1998. – № 4. – С. 3–9.
3. **Перспективные** технологии машиностроительного производства / О.П. Голубев, С.В. Кухта, Ж.А. Мрочек [и др.]; под общ. ред. Ж.А. Мрочка и М.Л. Хейфеца. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – 204 с..
4. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N.Y.: Springer, 2015. – 498 p.
5. **Зленко, М.А., Попович, А.А., Мутьлина, И.Н.** Аддитивные технологии в машиностроении. – СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 222 с.
6. **Хроника** промышленных революций: От парового двигателя к цифровому производству. Кто будет жить на Интернет-глобусе через 100 лет // *Ростелеком Professional*. 2016. №3 (15). – С. 16–17, 24–29.
7. **Хейфец, М.Л.** Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2016. № 4(58). – С. 3–9.
8. **Алферов, Ж.И.** История и будущее полупроводниковых гетероструктур // *Физика и техника полупроводников*. – 1998. – Т. 32. № 3.– С. 2–7.
9. **Хейфец, М.Л.** Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. – 272с.
10. **Хейфец, М.Л.** От аддитивного производства к самовоспроизведению машин, их узлов и деталей // *Научно-*

емкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 4(70). – С. 37–48.

11. **Витязь, П.А., Ильющенко, А.Ф., Хейфец, М.Л.** Оперативное макетирование и производство изделий сложной формы из композиционных материалов // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2011. – №2. – С. 3-8.

12. **Чижик, С.А., Хейфец, М.Л., Филатов, С.А.** Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2014. – №4(29). – С. 68–74.

REFERENCES

1. *Theoretical Fundamentals of Technological Complex Design* / A.M. Rusetsky, P.A. Vityaz, M.L. Heifets [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. – Minsk: Belarussian Science, 2012. – pp. 239.
2. Sirotkin, O. *Technological aspect of Russia at the turn of the XXI century* // *Economist*. – 1998. – № 4. – pp. 3–9.
3. *Promising Technologies of Engineering Production* / O.P. Golubev, S.V. Kukhta, Zh.A. Mrochec [et al.]; under the general editorship of Zh.A. Mrochec and M.L. Heifets. – Novopolotsk: PSU, 2007. – pp. 204.
4. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – N.Y.: Springer, 2015. – 498 p.
5. Zlenko, M.A., Popovich, A.A., Mutylyna, I.N. *Additive Technologies in Mechanical Engineering*. – S-Pb: Polytechnics Publishing House, 2013. – pp. 222.
6. Acta of Industrial Revolution: From steamer to digital production. Who will live on Internet-globe 100 years later // *Rostelecom Professional*. 2016. №3 (15). – pp. 16–17, 24–29.
7. Heifets, M.L. Additive synergistic technologies of layer-by-layer synthesis of composite products during power flows impact // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2016. № 4(58). – pp. 3–9.
8. Alferov, Zh.I. History and future of semiconductor heterostructures // *Physics and Engineering of Semiconductors*. – 1998. – T. 32. № 3.– pp. 2–7.
9. Heifets, M.L. *Design of Combined Machining Processes*. M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 272.
10. Heifets, M.L. From additive production to self-production of machines their units and parts // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – № 4(70). – pp. 37–48.
11. Vityaz, P.A., Ilyushchenko, A.F., Heifets, M.L. Efficient prototyping and production of complex composite products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – №2. – pp. 3-8.
12. Chizhik, S.A., Heifets, M.L., Filatov, S.A. Outlooks in development of technological complex of additive synthesis of composites and products shaping // *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. – 2014. – №4(29). – pp. 68–74.

Рецензент д.т.н. Ю.Л. Чигиринский

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"
 Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
 Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru
 Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 07.06.2017. Выход в свет 28.07.2017.
 Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.
 Тираж 500 экз. Свободная цена.

12+

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
 "Брянский государственный технический университет"
 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16