

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 6 (72)

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 ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Овчинников В.В., Андреева Л.П., Любимова Т.Д. Оксидные включения в швах алюминиевых сплавов, полученных методом сварки трением с перемешиванием 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Ямников А.С., Волков Д.П. Влияние угла профиля передней поверхности резца на степень деформации сдвига 14

Клепиков В.В., Черепяхин А.А. Особенности облегающего шевингования цилиндрических зубчатых колес 21

Пашков Е.В., Вожжов А.А. Моделирование процесса двурезцового точения фасонных поверхностей 25

Мелентьев В.В., Масленников Е.И., Порошин К.Г., Шибанов О.В. Наукоемкий датчик для вибродиагностики на базе технологии МЭМС и RFID 30

НАУКОУМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Влияние режимов резания на выходные параметры процесса при обработке поликристаллических композиционных материалов 34

ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Якимова М.А., Мельников Д.М., Садков А.Б., Григорьянц А.Г. Фотоакустическая гомогенизация вещества для оптических измерений . . . 39

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Колобовникова Д.И., Майданюк Е.П., Петровский Э.А. Автоматизация процесса центровки двигателя насосной установки 44

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 6 (72)

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. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

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

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

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

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

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

Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» 79195).

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

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

Registration certificate
ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN BLANK PRODUCTION

Ovchinnikov V.V., Andreeva L.P., Lyubimova T.D. Oxide inclusions in joints of aluminum alloys made by method of friction welding with mixing 3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Yamnikov A.S., Volkov D.P. Impact of cutting face profile angle upon shear deformation degree 14

Klepikov V.V., Cherepakhin A.A. Peculiarities in easy spur cog-wheel shaving . . . 21

Pashkov E.V., Vozhzhov A.A. Process simulation of profiled surface two-cutter turning 25

Melentiev V.V., Maslennikov E.I., Poroshin K.G., Shibanov O.V. Science intensive detector for vibration diagnostics based on MEMS and RFID technology . 30

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF NONMETALLIC PARTS PRODUCTION

Zubarev Yu.M., Priyomyshev A.V., Zaostrovsky A.S. Cutting mode impact upon output process parameters at processing of polycrystalline composite materials . . . 34

TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND LASER PROCESSING

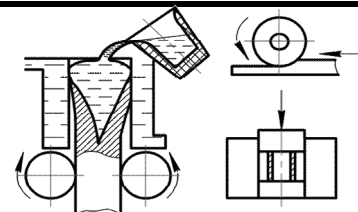
Yakimova M.A., Melnikov D.M., Sadkov A.B., Grigoriyants A.G. Photo-acoustic substance homogenization for optical measurements 39

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

Kolobovnikova D.I., Maidanyuk E.P., Petrovsky E.A. Automation of engine alignment in pumping facility 44

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
DOI: 10.12737/article_5928313a0cf047.54579014

**В.В. Овчинников, д.т.н.,
Л.П. Андреева, к.т.н.,
Т.Д. Любимова, к.т.н.**
(ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет",
105023, Москва, ул. Б. Семеновска, д. 38)
E-mail: vikov1956@mail.ru

Оксидные включения в швах алюминиевых сплавов, полученных методом сварки трением с перемешиванием

Представлены результаты влияния различной подготовки поверхности кромок на структуру металла шва и прочностные характеристики сварных соединений, полученных методом сварки трением с перемешиванием. В качестве объектов исследования были выбраны пластины из алюминиевых сплавов 1565, 1201, 1915, В-1341, 1420 и 1460 толщиной 5 мм, с различной обработкой кромок под сварку: зачисткой и обезжириванием; механической обработкой, для снятия поверхностного оксидного слоя; сварочной дугой переменного и постоянного тока, для «наращивания» поверхностного оксидного слоя и дальнейшего изучения его распределения в металле шва после процесса сварки. В статье представлены результаты исследования микроструктуры металла швов, а также результаты испытаний сварных соединений на прочность. Рассмотрено распределение оксида с поверхности кромок внутри металла шва и его влияние на прочностные свойства соединений.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; сварка трением с перемешиванием; оксидные включения; распределение оксидов; прочность соединений.

**V.V. Ovchinnikov, D. Eng.,
L.P. Andreeva, Can. Eng.,
T.D. Lyubimova, Can. Eng.**
(FSBEI HE "Moscow Polytechnic University", 38, B. Semyonovskaya, Moscow 105023)

Oxide inclusions in joints of aluminum alloys made by method of friction welding with mixing

The paper reports the results of the impact of different edge surfaces preparation upon the structure of a metal joint and strength characteristics of welds made by a method a friction welding with mixing. As objects of investigations there were chosen plates made of aluminum alloys 1565, 1201, 1915, V-1341, 1420 and 1460 with 5 mm thick with different edge machining for welding: by stripping and degreasing; by machining, for surface oxide layer removal; by AC and DC welding arc for "growing" a surface oxide layer and the further analysis of its distribution in a metal joint after welding. In the paper there are shown the results of metal joint micro-structure investigation and also test results of welds for strength. Oxide distribution from the surface of edge surfaces inside joint metal and its influence upon strength properties of joints is analyzed.

Keywords: aluminum alloy; friction welding with mixing; oxide inclusions; oxide distribution; joint strength.

Развитие различных отраслей машиностроения предъявляет все более жесткие требования к надежности, прочности и коррозионной стойкости сварных соединений. При этом возникает потребность использования в сварных конструкциях материалов, разработанных на основе комплексных систем легирования и получаемых с помощью новых технологий. Упомянутые материалы, обладая необходимым комплексом физико-механических характеристик, зачастую имеют низкую свариваемость в условиях традиционных методов сварки плавлением. В этом аспекте повышенный интерес для их соединения представляют методы сварки давлением, при использовании которых формирование шва происходит без образования жидкой сварочной ванны.

Из группы методов сварки давлением для целей формирования соединений материалов с низкой свариваемостью при сварке плавлением, интерес представляет метод сварки трением с перемешиванием, при котором соединение свариваемых элементов осуществляется за счет локализации теплоты и пластической деформации в зоне формирования шва [1, 2]. Этот метод в настоящее время занял одно из ведущих мест для соединения деталей из алюминиевых сплавов при изготовлении летательных аппаратов, объектов космической техники и коммерческого транспорта, железнодорожных вагонов и судов.

Сварные швы алюминиевых сплавов, полученные сваркой трением с перемешиванием, как правило, отличаются высоким качеством, отсутствием дефектов, мелкозернистой структурой. Благодаря формированию деформированной мелкокристаллической структуры швов и меньшему нагреву металла в зоне сварки степень разупрочнения соединений алюминиевых сплавов ниже, а предел прочности выше, чем при их сварке плавлением.

Однако условия формирования и качество швов существенно зависят от параметров процесса сварки и различных технологических факторов.

К основным параметрам относят: радиус бурта r_6 и конструктивные особенности рабочих поверхностей бурта и наконечника инструмента; угол наклона инструмента Q относительно вертикальной оси; усилие прижатия F рабочего инструмента к поверхностям свариваемых деталей; глубину погружения t бурта инструмента в свариваемый металл толщиной δ и проникновения наконечника l_n в стык; частоту вращения ω инструмента вокруг верти-

кальной оси; скорость сварки $v_{св}$ (рис. 1).

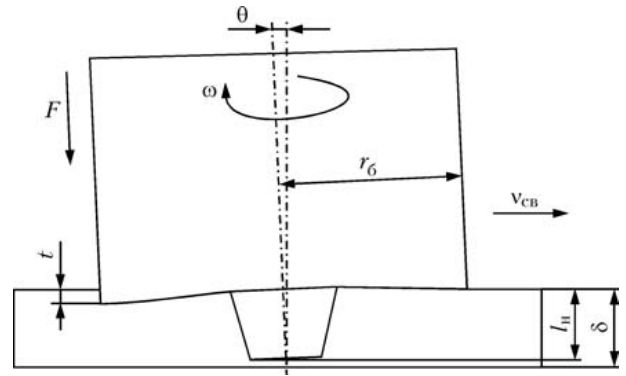


Рис. 1. Схема процесса СТП и его основные параметры

Стабильность процесса формирования швов и качество сварных соединений существенно зависят также от надежности фиксации свариваемых кромок, точности их подгонки и сборки, протяженности швов, конфигурации соединений и др. Эти технологические факторы могут приводить к возникновению чрезмерно больших зазоров в стыке, депланации кромок, смещению оси стыка относительно инструмента, а также к изменению некоторых параметров процесса сварки (усилия прижатия инструмента, глубины погружения бурта или проникновения наконечника). Вследствие неправильного выбора параметров СТП или их отклонения в процессе получения соединений, а также нарушения условий сборки и фиксации кромок в швах, как правило, образуются дефекты.

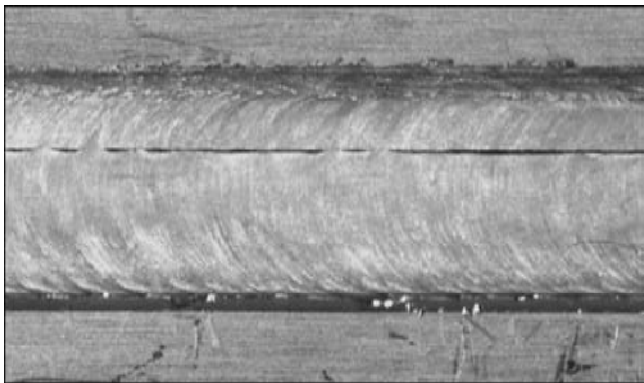
К основным причинам возникновения несплавлений на лицевой поверхности шва (рис. 2) можно отнести малый диаметр бурта инструмента; большой диаметр наконечника инструмента; значительное углубление на рабочей (торцевой) поверхности бурта инструмента в свариваемый металл; недостаточное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; малая частота вращения инструмента; значительная скорость сварки; большой зазор в стыке и смещение оси стыка относительно инструмента; ненадежная фиксация свариваемых кромок [3, 4].

При использовании инструмента с малым диаметром бурта или большим диаметром наконечника, объема пластифицированного металла может быть недостаточно для полного заполнения освобождающегося за инструмен-

том пространства, в результате чего на лицевой поверхности шва образуется дефект в виде несплавления.



а)



б)

Рис. 2. Вид лицевой поверхности шва с дефектом типа несплавление, выполненного СТП на алюминиевом сплаве 1565чМ толщиной 4 мм:

а – локальное; б – протяженное

Для стабилизации процесса сварки на торцевой поверхности бурта инструмента делают небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирования качественной лицевой поверхности шва.

Недостаточные заглабления бурта инструмента в свариваемый металл или усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей при сварке приводят к увеличению объема, заполняемого пластифицированным металлом при формировании шва, а следовательно, к снижению избыточного давления и образованию несплавления на лицевой поверхности шва протяженного типа.

При определенных соотношениях частоты вращения инструмента и скорости его перемещения по стыку выделяемого при трении

тепла может оказаться недостаточно для пластификации объема металла, необходимого для заполнения образуемой наконечником инструмента полости.

Наличие зазора в стыке также приводит к несплавлению, поскольку объема пластифицированного металла недостаточно для заполнения дополнительного пространства между свариваемыми кромками.

Недостаточная фиксация свариваемых кромок способствует возникновению зазора между ними, смещению оси стыка, депланации кромок и нарушению условий заглабления и прижатия бурта инструмента, в результате чего на лицевой поверхности швов образуются такие дефекты.

Причинами возникновения в швах несплавлений в корневой части (рис. 3) являются недостаточные для данной толщины свариваемого металла длина наконечника, погружение бурта инструмента в свариваемый металл и усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей в процессе сварки; большое смещение оси стыка относительно инструмента; износ наконечника инструмента в процессе сварки.



Рис. 3. Поперечный макрошлиф сварного соединения с несплавлением в корневой части шва (×25), полученного СТП на сплаве АМг5М толщиной 4 мм

Для обеспечения надежного перемешивания металла по всей толщине свариваемых кромок и формирования качественных швов наконечник инструмента должен иметь определенную для каждой толщины свариваемого металла длину. Если наконечник инструмента проникает практически на всю толщину кромок, то выделяемого при СТП тепла и прикладываемого силового воздействия достаточно, чтобы границы раздела поверхностей свариваемых деталей приближались по размеру к межзеренным границам. Иначе в корневой части шва возникает дефект в виде несплавления.

ления.

Однако даже при правильном выборе длины наконечника инструмента при СТП необходимо обеспечить требуемое погружение бурта инструмента в свариваемый металл и постоянное усилие прижатия инструмента к поверхностям свариваемых деталей, поскольку при сварке тонколистовых материалов даже незначительные перемещения инструмента в вертикальной плоскости могут привести к несплавлению в корневой части швов.

Для устранения дефектов типа несплавлений, распространяющихся на большую длину шва используют повторный проход инструмента СТП [5]. В случае же появления локальных несплавлений при СТП алюминиевых сплавов, обладающих хорошей свариваемостью при сварке плавлением, целесообразно использовать аргонодуговую сварку неплавящимся электродом для устранения такого типа дефектов [6].

Опыт применения аргонодуговой сварки неплавящимся электродом для устранения мало протяженных швов, полученных СТП на алюминиевых сплавах, показал, что в этом случае на поверхности подварочного шва появляется достаточно много фрагментов оксидных пленок (рис. 4).

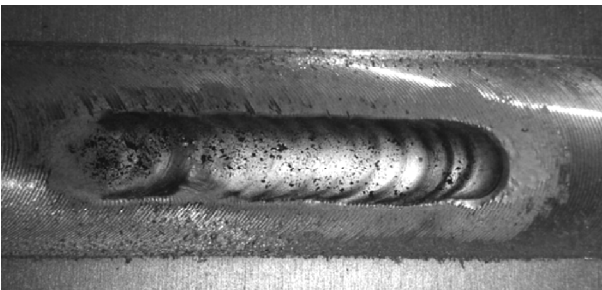


Рис. 4. Внешний вид шва СТП сплава 1565ч после наложения подварочного шва аргонодуговой сваркой

Целью данной работы явилось определение механизма появления оксидных включений в подварочных швах, выполненных аргонодуговой сваркой, и установление требований к подготовке кромок под сварку трением с перемешиванием.

Методика проведения экспериментов. В исследовании производили соединение пластин толщиной 5 мм из алюминиевых сплавов 1565чМ (система Al–Mg), 1201 (система Al–Cu), В-1341 (система Al–Mg–Si), 1915 (система Al–Zn–Mg), 1420 (система Al–Mg–Li) и 1460 (система Al–Cu–Li). Сварка осуществлялась как по целой пластине, так и по стыку

двух пластин. Для обеспечения минимального зазора в стыке кромки пластин предварительно фрезеровали.

Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке, изготовленной на базе вертикального фрезерного станка с ЧПУ и дополнительно оснащенного индикатором вертикального перемещения фрезерной головки. Для сварки использовался инструмент, выполненный из быстрорежущей стали со штифтом конусообразной формы в двух вариантах: с винтовой линией и без нее [7].

Сварку трением с перемешиванием пластин исследуемых алюминиевых сплавов выполняли на режиме: скорость сварки 28,2...33 м/ч; частота вращения рабочего инструмента 700...1000 об/мин.; осевое усилие на инструмент 9500 Н; угол наклона инструмента в вертикальной плоскости 3...4 °. Рабочий инструмент имел следующие параметры: диаметр заплечика – 14 мм; диаметр штифта 4,2 мм при длине штифта 4,8 мм.

Наличие дефектов и их размеры подтверждались металлографическими исследованиями поперечных микрошлифов сварных соединений, выявление структуры которых производили методом окунания в реактив $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:2:4$ с выдержкой 10...25 с. Оптическую металлографию осуществляли с использованием микроскопа Neophot-21.

Исследования прочностных характеристик проводили методами статического растяжения и изгиба по ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» с использованием универсальной разрывной машины UGTTSC-2000.

Фрактографическое изучение поверхности изломов, разрушенных образцов после механических испытаний проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии. Электронную микроскопию производили с помощью растрового электронного микроскопа сверхвысокого разрешения evo-50 фирмы Karl Zeiss, укомплектованного системой энергодисперсионного микроанализа, позволяющего производить картирование по элементному составу.

Полученные соединения подвергались рентгеновскому и ультразвуковому неразрушающему контролю. Пространственное расположение дефектов в сварном шве определялось с помощью компьютерной томографии. Для этого использовался рентгеновский томограф высокого разрешения TOLMI–150–10.

Для реконструкции и визуализации томографических данных были использованы продукты компании Bruker-microCT.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе исследовалось влияние подготовки поверхности при СТП по целой пластине на появление оксидных включений в подварочных швах, получаемых аргонодуговой сваркой.

По полученным результатам выбирался способ подготовки поверхности под СТП, обеспечивающий возможность осуществления бездефектных подварок.

На втором этапе при подготовке поверхности пластин по оптимальному варианту изучалось влияние способа раскроя пластин для получения стыка, а также наличие оксидов на торцевой поверхности стыкуемых кромок на интенсивность формирования оксидных включений в швах СТП.

Оксидные включения в подварочных швах определяли на нетравленных шлифах методом подсчета процента включений по площади поверхности и их удельной протяженности.

Пластины по целому металлу сваривали в состоянии поставки, после травления и химического фрезерования на контролируемую глубину, зачистки металлической щеткой, а также при выдержке в течение 24 ч образца при воздействии нагретого водяного пара.

Для определения характеристик поверхности образцов из алюминиевых сплавов применяли термо-десорбционный масс-спектрометрический метод. Процесс газовой выделенности с поверхности исследовали на установке для вакуумного нагрева с индукционной печью, принципиальная схема которой приведена в работе [8], и на установке для нагрева поверхности лучом лазера по методике работы [9]. В процессе нагрева выделяющиеся газы постоянно прокачивали через датчик масс-спектрометра, с помощью которого регистрировали масс-спектр в диапазоне $m/e = 1 \dots 60$.

Для получения стыка пластин применяли резку на гильотинных ножницах, раскрой с помощью лазера и гидроабразивной струи, а также получали на торцевых поверхностях кромок утолщенную оксидную пленку за счет выдержки в течение 24 ч образца при воздействии нагретого водяного пара.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В табл. 1 приведены результаты исследований. Видно, что от метода подготовки поверхности значительно зависит ее микрогеометрия. Особенно резко она ухудшается после зачистки щеткой и химического фрезерования

(так, максимальная высота микровыступов увеличивается в 4–9 раз по сравнению с исходной).

Структура оксидной пленки на поверхности исследуемых алюминиевых сплавов после различных вариантов обработки приведена на рис. 5.

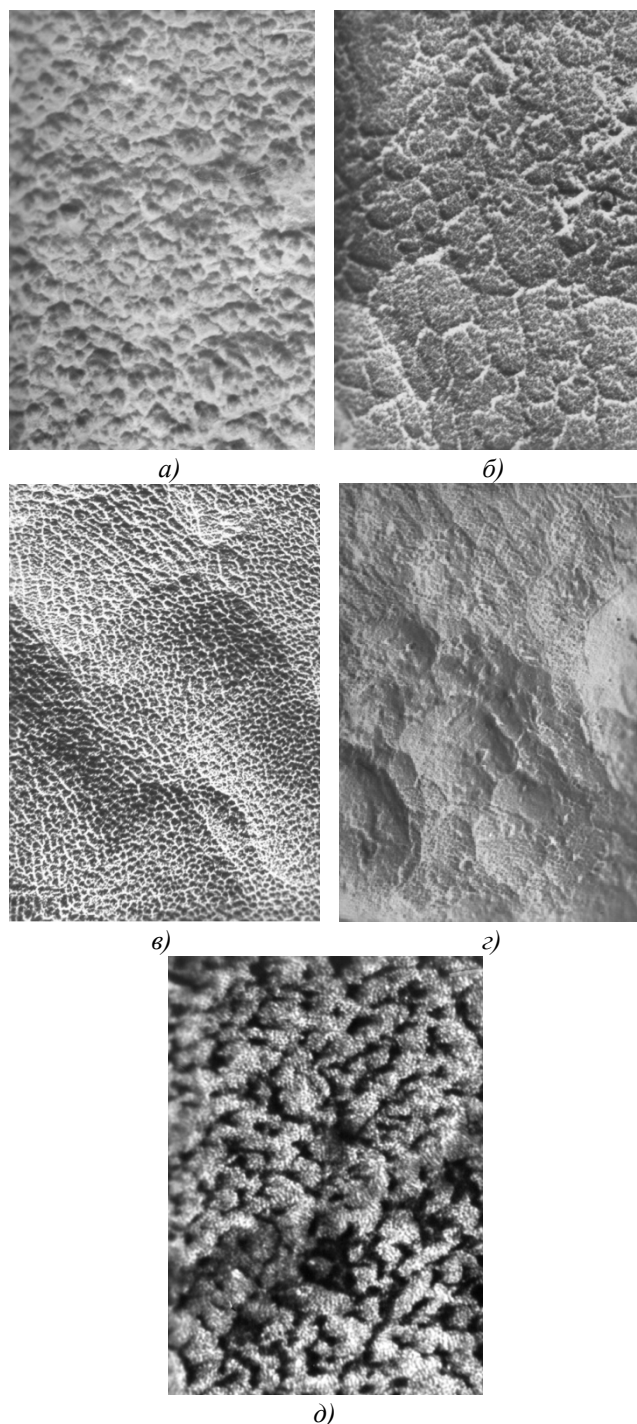


Рис. 5. Поверхность листов сплава 1565ЧМ после различных видов обработки:
а – состояние поставки после обезжиривания; *б* – химическое травление; *в* – химическое фрезерование; *г* – химическое полирование; *д* – химическое травление + обработка нагретым водяным паром

1. Влияние метода подготовки поверхности алюминиевых сплавов на высоту микровыступов

Подготовка поверхности	Высота микровыступов, мкм, для сплавов					
	В-1341	1565ч	1201	1420	1460	1915
Состояние поставки после обезжиривания	1,0...1,5	0,9...1,2	0,8...1,5	1,3...2,9	0,9...2,4	1,1...2,6
Химическое травление	2,1...3,5	1,9...2,7	2,0...3,1	2,8...4,4	2,2...3,8	2,5...3,9
Химическое полирование	1,2...1,7	1,1...1,5	0,9...1,6	1,9...3,2	1,5...2,7	1,3...2,6
Химическое фрезерование	4,5...6,0	3,9...5,5	4,9...6,2	6,1...7,5	5,4...7,2	5,1...6,9
Химическое травление + обработка нагретым водяным паром	2,1...3,4	1,9...3,1	2,0...3,0	3,1...4,4	2,6...4,2	2,1...3,7
Зачистка вращающейся металлической щеткой	8,2...16,4	7,5...13,5	6,0...14	7,5...16	6,8...15,4	8,2...12,7

2. Структура и толщина оксидных пленок на алюминиевых сплавах в зависимости от метода подготовки поверхности

Марка сплава	Метод подготовки поверхности	Структура оксидных пленок	Толщина пленки, мм	
			отдельных составляющих	общая
1915	Состояние поставки	MgO MgO + Al ₂ O ₃	0,005...0,15 0,015...0,03	0,020...0,45
	Химическое травление	MgO MgO + Al ₂ O ₃	0,003...0,01 0,01...0,025	0,013...0,35
	Зачистка вращающейся щеткой	Al ₂ O ₃ + MgO	0,015...0,026	0,015...0,026
1565ч	Состояние поставки	MgO (ZnO, MgO) + Al ₂ O ₃	0,002...0,12 0,018...0,035	0,025...0,40
	Химическое травление	MgO MgO + Al ₂ O ₃	0,002...0,012 0,01...0,028	0,013...0,38
	Зачистка вращающейся щеткой	Al ₂ O ₃ + MgO	0,012...0,020	0,012...0,020
1201	Состояние поставки	Al ₂ O ₃	0,007...0,017	0,007...0,017
	Химическое травление		0,005...0,014	0,005...0,014
	Зачистка вращающейся щеткой		0,003...0,01	0,003...0,01
В-1341	Состояние поставки	MgO MgO + Al ₂ O ₃	0,002...0,11 0,010...0,02	0,015...0,38
	Химическое травление	MgO MgO + Al ₂ O ₃	0,002...0,008 0,01...0,020	0,010...0,27
	Зачистка вращающейся щеткой	Al ₂ O ₃ + MgO	0,011...0,020	0,011...0,020
1420	Состояние поставки	Li ₂ O + LiOH	0,004...0,007	0,10...0,36
		MgO MgO + Al ₂ O ₃	0,009...0,013 0,02...0,05	
		Al ₂ O ₃	0,002...0,005	
	Химическое травление	Li ₂ O + LiOH	0,002...0,005	0,070...0,28
		MgO MgO + Al ₂ O ₃	0,01...0,014 0,012...0,05	
		Al ₂ O ₃	0,002...0,006	
	Зачистка вращающейся щеткой	Al ₂ O ₃ + MgO	0,012...0,024	0,012...0,024
1460	Состояние поставки	Li ₂ O + LiOH	0,002...0,005	0,05...0,17
		Li ₂ O + Al ₂ O ₃	0,008...0,012	
		Al ₂ O ₃	0,003...0,009	
	Химическое травление	Li ₂ O + LiOH	0,004...0,01	0,03...0,15
		Li ₂ O + Al ₂ O ₃	0,006...0,011	
		Al ₂ O ₃	0,003...0,009	
Зачистка вращающейся щеткой	Al ₂ O ₃	0,01...0,02	0,01...0,02	

Поверхности оксидных слоев на всех сплавах, показанные на рис. 5, после окисления горячим паром в течение 24 ч, в основном, не

очень отличаются. Толщина оксидной пленки, полученная таким образом, составляла примерно 0,5...1,0 мкм. В основном, все оксиды

на алюминиевых сплавах состоят из очень тонкого аморфного слоя Al_2O_3 , который имеет толщину около 5 нм на котором образуется гидрооксидный слой толщиной до 1 мкм.

Из-за очень низкого парциального давления, которого достаточно для создания оксида алюминия, практически, невозможно избежать образования аморфного слоя. Было бы правильно говорить оксидно-гидрооксидный слой, но для простоты продукт окисления будет называться в данной статье оксидной пленкой.

Установлено, что структура и толщина оксидных пленок на поверхности резко отличаются и определяются химическим составом сплавов и методом подготовки (табл. 2).

Экспериментальные данные о влиянии различных методов обработки поверхности алюминиевых сплавов на общее газосодержание и, в частности, на содержание адсорбированной на поверхности влаги приведены на рис. 6–8.

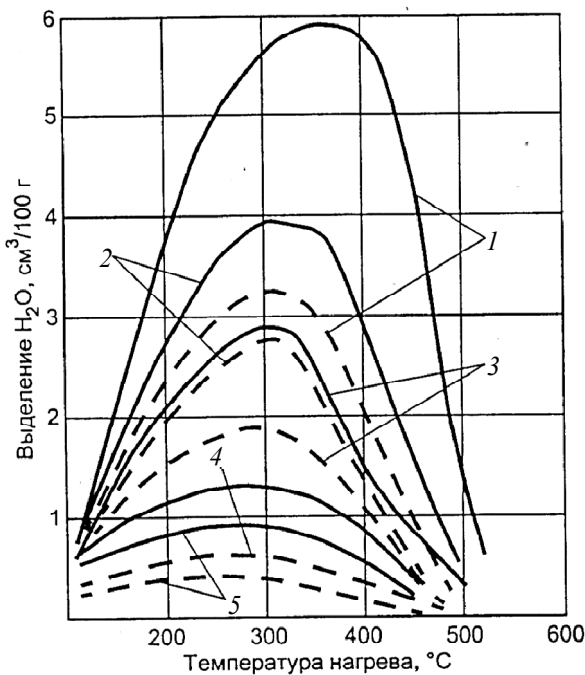


Рис. 6. Характер десорбции влаги с поверхности сплавов 1565ч (сплошная линия) и 1201 (штриховая) после обезжиривания бензином (1), химического травления (2), химического (3) и скоростного (4) фрезерования, химического полирования (5)

Кривые газовыделения с поверхности образцов из сплавов 1565ч и 1201 показывают (рис. 6), что методы подготовки поверхности существенно влияют на общее газосодержание и, в частности, количество адсорбированной влаги. Например, такие методы подготовки поверхности, как химическое травление и химическое фрезерование, зачистка щеткой

снижают количество адсорбированной влаги соответственно в 1,4; 2,2; 3,6 и 9,3 раза по сравнению с состоянием поставки и при обезжиривании ацетоном (бензином).

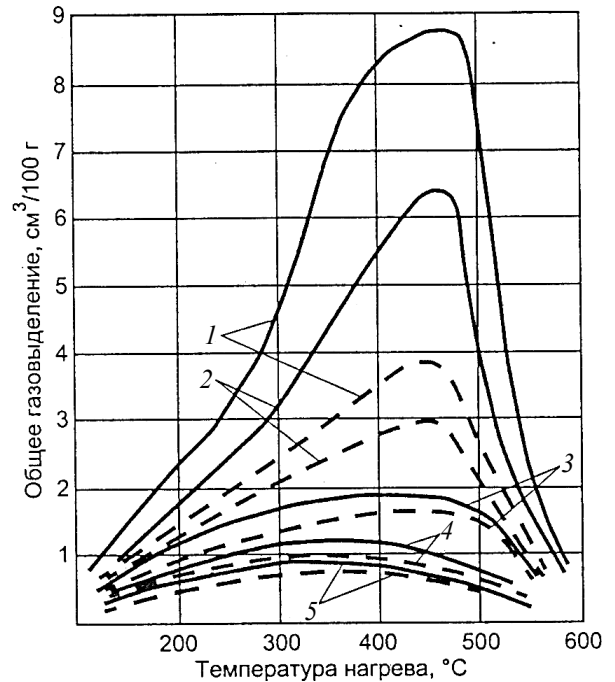


Рис. 7. Характер изменения общего газовыделения с поверхности сплавов 1469 (сплошная линия) и В-1341 (штриховая):

1–5 – см. рис. 6

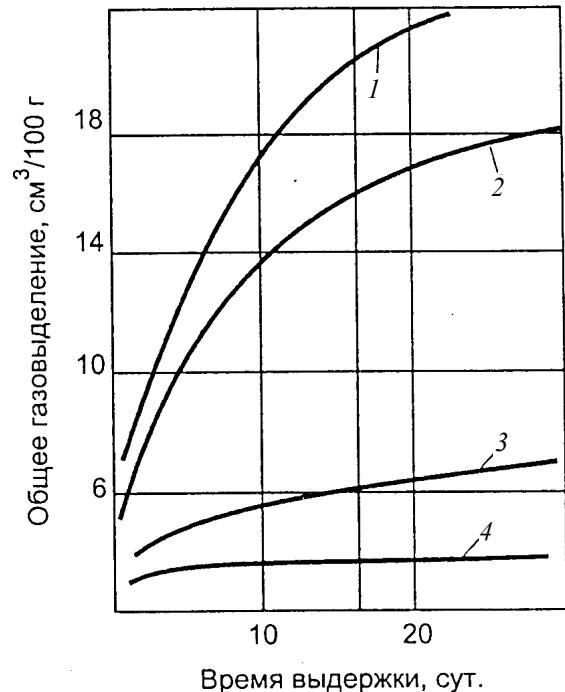


Рис. 8. Зависимость общего газосодержания образцов после химического травления от времени выдержки во влажной атмосфере (100 %-ной относительной влажности):

1 – сплав 1420; 2 – сплав 1565ч; 3 – сплав 1201; 4 – сплав В-1341

Применительно к сплавам В-1341 и 1460 общее газовыделение с поверхности также определяется методом ее подготовки. Скоростное фрезерование и химическое полирование снижают общее газовыделение примерно в 7–10 раз (рис. 7).

Выдержка образцов после различных способов подготовки до сварки также заметно влияет на газовыделение с поверхности. Согласно анализу кривых газовыделения (рис. 8), абсолютные показатели зависят от марки сплава. Так, для сплавов 1420, 1565ч, 1201 и В-1341 после выдержки в течение 10 – 15 суток во влажной атмосфере общее газосодержание увеличивается соответственно в 2,9; 2,3; 1,3 и 1,04 раза. Такое резкое отличие определяется только спецификой структурного строения оксидных пленок и их толщиной на разных сплавах.

Таким образом, методы подготовки поверхности, условия и длительность хранения деталей после подготовки под сварку значительно влияют на газосодержание поверхности.

Анализ фазового состава оксидных пленок на сплаве 1565ч показал, что они состоят из оксида магния. Слои пленки, прилегающие к основе сплава, содержат магниевую шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$. Толщина данной пленки составляет 0,02...0,045 мм.

Оксидная пленка на сплаве 1201 состоит из γ -модификации Al_2O_3 с увеличенным параметром кристаллической решетки вследствие присутствия двухвалентных катионов меди.

Оксидная пленка на сплавах типа 1420 состоит из Li_2O , который, взаимодействуя на воздухе с углекислым газом и парами воды, превращается в $LiOH$ и Li_2CO_3 . Кроме лития окисляются магний и алюминий с образованием MgO и Al_2O_3 . Толщина оксидной пленки в 7–9 раз больше, чем на сплавах типа 1201 и в 1,5–2 раза больше, чем на сплавах типа 1565ч.

Оксидная пленка на сплаве В-1341 состоит из γ -модификации Al_2O_3 с увеличенным параметром кристаллической решетки вследствие присутствия двухвалентных катионов кремния.

Оксидная пленка на сплавах типа 1460 состоит в основном из Li_2O , который взаимодействует с углекислым газом и парами воды с образованием $LiOH$ и Li_2CO_3 . Толщина оксидной пленки в состоянии поставки составляет 0,013...0,03 мм.

В табл. 3 представлены результаты анализа засоренности подварочного шва, выполненного аргонодуговой сваркой по шву СТП на исследуемых сплавах в зависимости от технологии подготовки поверхности заготовок под СТП.

Из полученных данных следует, что засоренность подварочных швов определяется состоянием поверхности заготовки, методом подготовки поверхности алюминиевого сплава к сварке тернием с перемешиванием и системой легирования сплава. Наибольшую склонность к засоренности подварочных швов оксидными включениями проявляют сплавы системы Al–Mg, Al–Mg–Li и Al–Cu–Li.

3. Влияние метода подготовки поверхности алюминиевых сплавов под СТП на засоренность подварочных швов оксидными включениями

Подготовка поверхности	Средний процент включений на 1 см ² поверхности подварочного шва					
	В-1341	1565ч	1201	1420	1460	1915
Состояние поставки после обезжиривания	18	32	15	53	44	28
Химическое травление	4	8	5	25	20	11
Химическое полирование	0	0	0	3	1	0
Химическое фрезерование	0	1	0	2	1	0
Химическое травление + обработка нагретым водяным паром	25	38	15	66	51	35
Зачистка вращающейся металлической щеткой	7	15	3	38	32	12
Подготовка поверхности	Средняя протяженность оксидного включения, мм					
	В-1341	1565ч	1201	1420	1460	1915
Состояние поставки после обезжиривания	0,8	2,1	0,5	2,5	1,7	1,3
Химическое травление	0,2	0,7	0,2	1,8	1,1	0,4
Химическое полирование	0	0,1	0	0,4	0,3	0
Химическое фрезерование	0	0,15	0	0,33	0,24	0,10
Химическое травление + обработка нагретым водяным паром	1,6	2,9	0,9	3,7	2,3	1,8
Зачистка вращающейся металлической щеткой	0,35	1,06	0,25	2,14	1,35	0,67

Механизм образования оксидных включений на поверхности подварочных швов можно представить следующим образом. При наличии толстой оксидной пленки на поверхности заготовки при сварке трением с перемешиванием под действием заплечика рабочего инструмента происходит ее фрагментация. Непосредственно поверхностный слой шва СТП насыщается фрагментами оксидной пленки. При выполнении подварочного шва аргодуговой сваркой образование жидкого расплава сварочной ванны приводит к объединению и всплыванию фрагментов оксидной пленки на поверхность подварочного шва.

На втором этапе исследований изучалось влияние способа раскроя пластин алюминиевых сплавов под СТП на засоренность подварочных швов оксидными включениями.

Исследование макроструктуры соединений СТП, выполненных на пластинах сплава 1565ч, торцевые кромки которых подвергались воздействию водяного пара, показало, что в шве присутствует довольно толстая оксидная пленка (рис. 9).

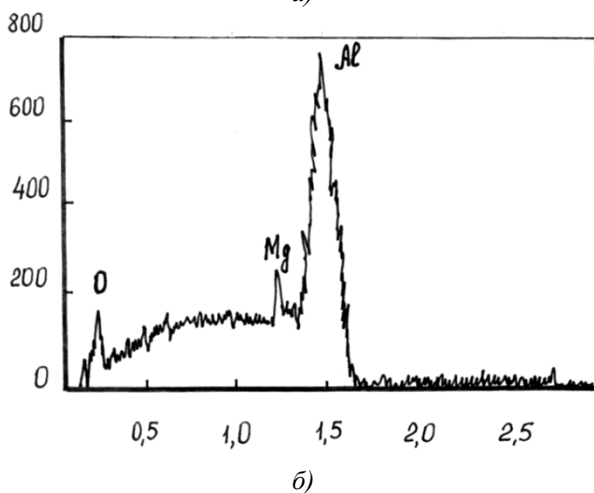
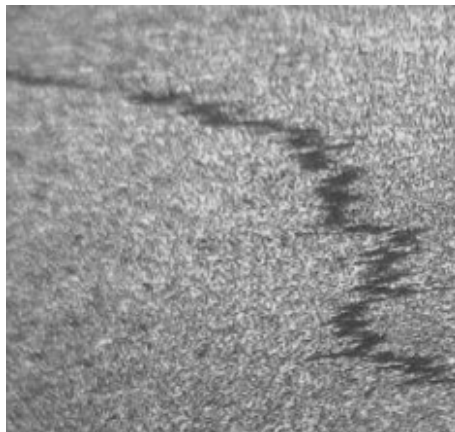


Рис. 9. Оксидное включение в шве СТП сплава 1565ч (а) и результаты анализа элементного состава включения (б)

С помощью анализа элементов можно обнаружить в темных включениях алюминий и большой объем кислорода. Это указывает на оксид-гидрооксид, который ранее находился на торцевых поверхностях свариваемых кромок.

При более сильном увеличении под растровым электронным микроскопом, можно распознать остатки оксидного слоя по их размеру и структуре. Эти остатки находятся около корня сварного шва, на границе между зоной смешивания и простираются до области закручивания на стороне подачи в приблизительном полукруге. Плотность обнаруженных оксидных фрагментов уменьшается по мере увеличения расстояния от корня сварного шва, так как границы поверхностей растягиваются достаточно широко друг от друга, и слой оксидов подвергается деформации сдвига в процессе перемешивания.

На рис. 10 представлены результаты исследования влияния способа подготовки торцевой поверхности кромок пластин сплава 1565чМ под СТП на загрязненность оксидными включениями подварочных швов.

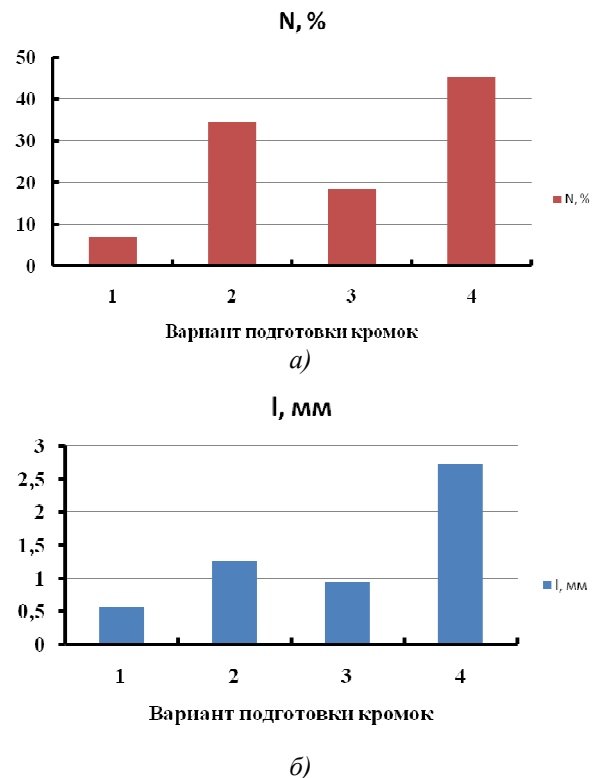


Рис. 10. Влияние способа подготовки торцевой поверхности кромок сплава 1565чМ под СТП на загрязненность подварочных швов оксидными включениями:

а – средний процент включений на 1 см² поверхности подварочного шва; б – средняя протяженность оксидного включения, мм

Результаты выполненных исследований показали, что при всех рассмотренных способах подготовки торцевой поверхности свариваемых кромок удается получить качественное сварное соединение при СТП. Состояние торцевой поверхности свариваемых кромок пластин перед СТП оказывает влияние на загрязненность оксидными включениями подварочных швов. При этом наилучшие результаты достигаются при резке листовых заготовок на гильотинных ножницах, а худшие – при обработке кромок водяным паром.

При исследовании влияния толстой оксидной пленки на торцевой поверхности свариваемых кромок пластин, полученной при их обработке водяным паром, на загрязненность оксидными включениями подварочных швов выявлена интересная особенность влияния профиля рабочего инструмента СТП на распределение фрагментов оксидов в шве.

При использовании рабочего инструмента с винтовой канавкой на штыре фрагменты оксидных пленок не обнаруживаются на оптическом микроскопе из-за небольших размеров. Мельчайшие остатки оксидов можно обнаружить только под растровым микроскопом. Они расположены достаточно далеко от начальной точки (корень сварного шва или кромки, образующие соединение), т.е. внутри зоны перемешивания. Эти оксиды были раздроблены до такой степени, что расстояние между граничными поверхностями составляет около 20 мкм. Распределение фрагментов оксидных пленок в зоне перемешивания достаточно равномерное, что объясняется направлением перемещения потоков пластифицированного металла в процессе СТП (рис. 11).

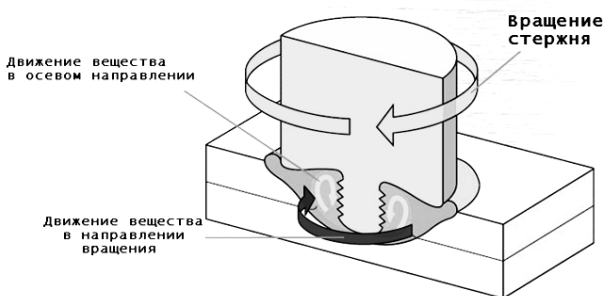


Рис. 11. Направление течения пластифицированного металла при СТП алюминиевых сплавов

В случае использования для сварки пластин рабочего инструмента с гладким штырем диаметром 4 мм имеет место распределение фрагментов оксидных пленок по всему сечению шва, причем их максимальная концен-

трация наблюдается на расстоянии 2,3...3,1 мм от оси стыка.

На соединениях алюминиевых листов, полученных при сварке трением с перемешиванием, предварительно окисленных в горячем водяном паре до сварки, процесс СТП переносит оксиды поверхности на кромки листа в виде фрагментов различной протяженности. Дефекты корня и дефекты ядра сварной точки были вызваны сильно оксидным слоем на граничной поверхности между предельно деформированной зоной перемешивания и менее деформированным металлом в зоне термомеханического влияния. Этот искусственно созданный оксидный слой привел к разрушению соединения по граничной поверхности во время испытания на растяжение.

Даже при оптимальных параметрах СТП, дефекты могут проявиться в шве как результат чрезвычайно окисленных свариваемых кромок листов. В любом случае можно допустить, что негативное влияние оксидных включений на механические свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП, не проявляются заметно ниже определенного размера фрагментов остатков оксидов.

Точная характеристика величины этого критического размера имеет принципиальное значение для сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов.

Чтобы понять вопросы, касающиеся того, сколько времени можно допустить для хранения заготовок до СТП и какой толщины оксидный слой должен быть удален до сварки трением с перемешиванием, необходимо провести еще исследования для СТП с уменьшенной толщиной оксидной пленки. Эти исследования становятся более сложными методически, так как распределение оксидов в сварном шве можно зарегистрировать только исключительно с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

Для количественной оценки необходимо помнить, что результаты исследований, полученные с толстыми оксидными слоями, нельзя с легкостью переносить на тонкие оксидные слои. Главное различие между тонкими и толстыми оксидными слоями в этой связи относится к тому, что толстый слой значительно более хрупкий, чем тонкие слои, обладающие большей эластичностью. В результате экструзии пластифицированного металла при СТП, толстые оксидные слои разрываются, а тонкие оксидные слои имеют тенденцию распределяться, как клубки или скопления в металле зоны интенсивного перемешивания.

Для более объективной оценки влияния оксидных включений на механические свойства соединений алюминиевых сплавов, выполненных СТП, целесообразно выполнить исследование выносливости соединений.

Таким образом, в результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для снижения загрязненности подварочных швов, выполняемых сваркой плавлением на швах СТП, подготовку поверхности пластин алюминиевых сплавов к СТП надо осуществлять в соответствии с требованиями технологии подготовки алюминиевых сплавов под сварку плавлением.

2. Наличие на торцевой поверхности свариваемых кромок толстого оксидного слоя может являться причиной не только загрязненности подварочных швов оксидными включениями, но и снижения механических характеристик соединений СТП алюминиевых сплавов при испытаниях на статическое растяжение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Покляцкий, А.Г., Чайка, А.А., Клочков, И.Н., Яворская, М.Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов различных систем легирования // Автоматическая сварка. – 2010. – №10. – С.18 – 22.

2. Овчинников, В.В. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиевых и магниевых сплавов (обзор) // Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – №4. – С. 22–45.

3. Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // *Welding International*. – 2003. – № 8. – P. 624–630.

4. Овчинников, В.В., Дриц, А.М., Малов, Д.В. Двухпроходная сварка трением с перемешиванием листов из сплава 1565чМ // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №6. – С. 36–42.

5. Лукин, В.И., Овчинников, В.В., Йода, Е.Н. и др. Сварка трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469. // Сварочное производство. 2015. – №7. – С. 21–25.

6. Овчинников, В.В. Научно-технические технологии сварки в производстве объектов транспорта из алюминиевых сплавов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5. – С. 3–9.

7. Овчинников, В.В., Дриц, А.М., Малов, Д.В. Механические свойства сварных соединений сплавов 1565чМ и

1460Т1 в разноименном сочетании, полученных сваркой трением с перемешиванием // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – №6. – С. 11–17.

8. Рязанцев, В.И., Савостиков, А.И. Исследование газовой выделения при нагреве деформируемых свариваемых алюминиевых сплавов. // Сварочное производство. – 1990. – №12. – С. 32–34.

9. Овчинников, В.В., Рязанцев, В.И., Савостиков, А.И. Исследование газовой выделения при нагреве деформируемых свариваемых алюминиевых сплавов // Сварочное производство. – 1991. – №6. – С.14–19.

REFERENCES

1. Poklyatsky, A.G., Chaika, A.A., Klochkov, I.N., Yavorskaya, M.R. Friction welding with mixing aluminum alloys of different alloying systems // *Automated Welding*. – 2010. – №10. – pp.18 – 22.

2. Ovchinnikov, V.V. Technological peculiarities in friction welding with mixing aluminum and magnesium alloys (review) // *Mechanical Engineering and Engineering Education*. – 2016. – №4. – pp. 22–45.

3. Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // *Welding International*. – 2003. – № 8. – P. 624–630.

4. Ovchinnikov, V.V., Drits, A.M., Malov, D.V. Two-pass friction welding with mixing sheets made of alloy 1565chM // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – №6. – pp. 36–42.

5. Lukin, V.I., Ovchinnikov, V.V., Yoda, E.N. et al. Friction welding with mixing high-strength aluminum-lithium alloys V-1461 and V-1469. // *Welding Engineering*. 2015. – №7. – pp. 21–25.

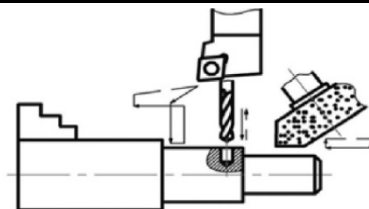
6. Ovchinnikov, V.V. Science intensive technologies of welding in manufacturing transport objects of aluminum alloys // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – №5. – pp. 3–9.

7. Ovchinnikov, V.V., Drits, A.M., Malov, D.V. Mechanical properties in welds of alloys 1565chM and 1460T1 in heteronormous composition made by friction welding with mixing // *Blank Production in Mechanical Engineering*. – 2015. – №6. – pp. 11–17.

8. Ryazantsev, V.I., Savostikov, A.I. Gas evolution analysis at heating deformed welded aluminum alloys. // *Welding Engineering*. – 1990. – №12. – pp. 32–34.

9. Ovchinnikov, V.V., Ryazantsev, V.I., Savostikov, A.I. Gas evolution analysis at heating deformed welded aluminum alloys // *Welding Engineering*. – 1991. – №6. – pp.14–19.

Рецензент акад. РАН В.И. Лысак



УДК 621.9.01

DOI: 10.12737/article_5928313a1d2191.50016044

А.С. Ямников, д.т.н.

(Тульский государственный университет,
300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)

Д.П. Волков, к.т.н.

(ЗАО «ПО «Тулаэлектропривод», 301114, Россия, Тульская область,
Ленинский район, пос. Плеханово, ул. Заводская, д. 1)

E-mail: Yamnikovas@mail.ru; dreamslider@mail.ru

Влияние угла профиля передней поверхности резца на степень деформации сдвига

Рассмотрено влияние угла профиля передней поверхности резца на степень деформации сдвига. Приведены аналитические зависимости для определения углов схода стружки, относительного сдвига, степени деформации сдвига и величины касательных напряжений в зоне резания с учетом влияния прочности обрабатываемого материала, ширины и толщины срезаемого слоя и коэффициента трения. Зависимости проверены экспериментально при резании резцом с трапецидальным профилем.

Ключевые слова: профильный резец; деформация сдвига; угол схода стружки.

A.S. Yamnikov, D. Eng.,

(State University of Tula, 92, Lenin Avenue, Tula 300012, Russia)

D.P. Volkov, Can. Eng.

(CC "PC "Tulaelectrodrive", 1, Zavodskaya Str., Plekhanovo, Lenin Region, Tula Province 301114, Russia)

Impact of cutting face profile angle upon shear deformation degree

It is established that cutting with gear-cutting and thread-cutting tools is not free that results in the increase of loading upon tool tips and their quick wear. The layers of metal cut are subjected to considerable shear deformation and also to other kinds of deformation. In this connection the wear character of a tool and its properties will change. There is considered a process of chip removal by trapezoidal and triangular cutters (as in case of metal cutting off with teeth of a hob may be used not three but two tool tips) and the impact of a cutting face profile angle upon a shear deformation degree is also considered. There are shown analytical dependences for the definition of angles of a chip flow, a relative shear, a deformation degree of a shear and a value of tangential stresses in the cutting area taking into account the influence of the strength of material machined, width and thickness of a layer cut and a friction factor. The dependences are checked up at cutting with a trapezoidal cutter.

Keywords: profile cutter; shear deformation; angle of chip flow.

Резание зуборезными и резборезными инструментами является несвободным [1, 2]. Это приводит к увеличению нагрузки на режущие кромки инструмента и их повышенному износу [3 – 5]. При рассмотрении механики образования сливной стружки пластически деформированную зону представляют в виде параллелограмма, а сам процесс образования слив-

ной стружки как результат последовательных сдвигов тонких слоев металла по плоскости сдвига, создающей с направлением движения резца угол сдвига θ [6 – 7].

При свободном резании характеристиками величины деформации срезаемого слоя являются относительный сдвиг ζ и коэффициент усадки K .

$$\zeta = \operatorname{ctg}\theta + \operatorname{tg}(\theta - \gamma); \quad (1)$$

$$K = \frac{\cos(\theta - \gamma)}{\sin\theta}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что ζ и K зависят от переднего угла γ и угла сдвига θ . Угол сдвига оказывает наибольшее влияние, так как его небольшое изменение приводит к большому изменению деформации.

Слои срезаемого металла подвергаются значительной деформации сдвига, а также другим видам деформации. В связи с этим изменится характер износа инструмента и его характеристики.

С целью улучшения условий резания рассмотрим процесс снятия стружки трапецидальным и треугольным резцами (так как в случае срезания металла зубьями червячной фрезы могут быть задействованы не три, а две режущие кромки). При несвободном резании двумя режущими кромками сдвиг тонких слоев металла идет под углом к ним. Для определения величины сдвига следует определить составляющие деформации сдвига – продольную и поперечную. Продольная составляющая направлена вдоль режущей кромки, поперечная – нормально к режущей кромке.

Рассмотрим процесс срезания слоев металла резцом с двумя режущими кромками (рис. 1) с углами в плане φ_1 и φ_2 и режущими кромками AB и BC .

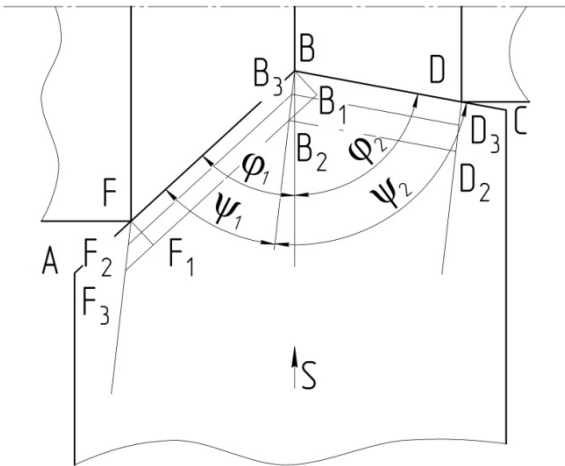


Рис. 1. Схема деформации элементов стружки

При свободном резании элемент стружки, срезаемый кромкой AB , имеет форму FBB_1F_1 , образующуюся в результате сдвига слоев по плоскости сдвига, перпендикулярно режущей кромке AB . Образовавшийся элемент перемещается перпендикулярно AB , но такому его свободному перемещению мешает второй элемент стружки, перемещающийся по нормали к режущей кромке BC . Элемент FBB_1F_1 ,

подвергаясь дополнительному сдвигу, примет форму FBB_2F_2 , становясь длиннее и уже. Аналогичный процесс произойдет со стружкой, срезаемой режущей кромкой BC .

Степень деформации сдвига выразим через относительный сдвиг ζ_B . Тогда, для стружки, срезаемой режущей кромкой AB , получим формулу

$$\zeta_{1B} = \frac{B_2B_1}{B_1B} = \operatorname{ctg}\psi_1. \quad (3)$$

Для стружки, срезаемой режущей кромкой BC , получим:

$$\zeta_{2B} = \operatorname{ctg}\psi_2. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) можно сделать вывод, что интенсивность сдвига зависит от угла схода стружки ψ – угла между направлением схода стружки и режущей кромкой. Чем меньше угол ψ , тем больше величина сдвига. Например, при нарезании впадины трапецидальным резцом с углом профиля 60° относительный сдвиг для стружки, срезаемой вершиной резца, составит 0° , а для стружки, срезаемой боковыми кромками, составит $\zeta_{1B} = \zeta_{2B} = 1,73$.

Из-за неодинаковой толщины стружки происходит разрыв по ее границам и скольжение по боковым поверхностям. Если же прочности стружки в сечении BB_2 оказывается достаточно, то разрыва не произойдет. Тогда элемент стружки FBB_2F_2 испытает со стороны соседней стружки дополнительное сжатие и примет форму FBB_3F_3 . В этом случае угол сдвига уменьшится, толщина стружки увеличится.

При одновременной работе режущих кромок V-образного или трапецидального резца возможно образование двух типов стружки: монолитной, без разрывов (чаще бывает плоской или слабо завитой в спираль); с разрывом по боковым поверхностям в месте давления соседних стружек (каждая из частей стружки закручена в спираль).

Согласно формуле (1) для определения нормальной составляющей деформации сдвига требуется найти значение угла сдвига θ . Для этого за плоскость сдвига принимаем плоскость максимальных касательных напряжений.

Со стороны передней поверхности резца в процессе резания на срезаемый слой действуют сила нормального давления N и трения о переднюю поверхность $N\mu$, где μ – коэффициент трения. В качестве точки приложения этих сил возьмем точку M (рис. 2).

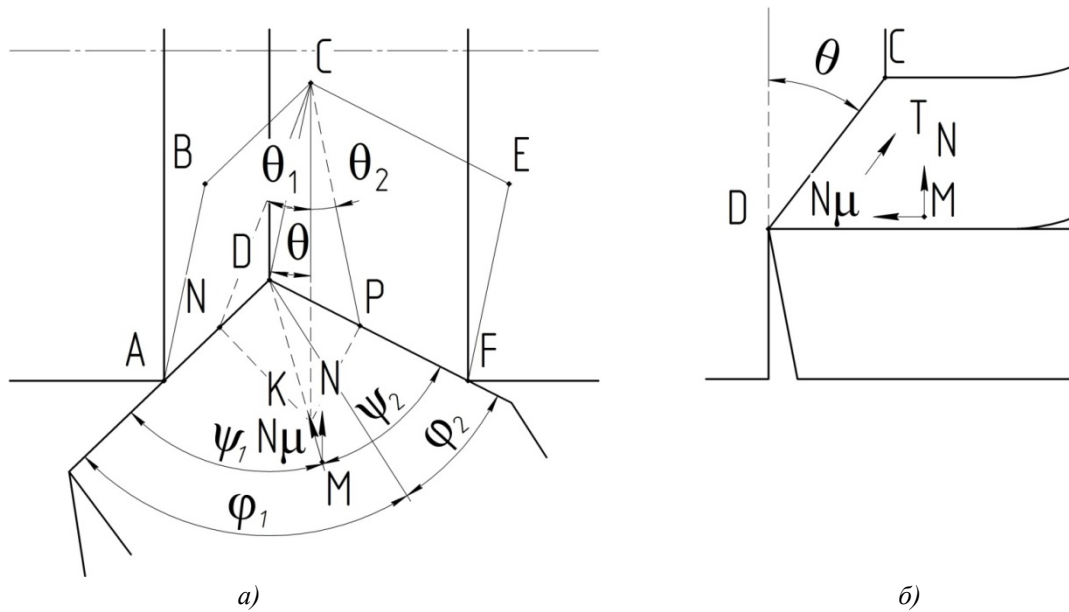


Рис. 2. Силы нормального давления и трения:
 а – плоскости сдвига; б – ребро пересечения плоскостей сдвига

Через режущие кромки под углами сдвига θ_1 и θ_2 к направлению движения резца проведем плоскости $ABCD$ и $FECD$. Из точки C , лежащей на линии пересечения плоскостей, проведем прямую CK , нормальную к передней поверхности. Перпендикулярно к режущим кромкам через CK проведем плоскости CKN и CKP .

Из полученных треугольников после некоторых преобразований получим выражения:

$$\operatorname{tg}\theta_2 = \frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} \operatorname{tg}\theta_1; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\sin \psi_1}. \quad (6)$$

Спроектировав N и $N\mu$ на плоскость CKD , определим величины касательных напряжений:

$$T = \frac{N}{\cos \rho} \cos(\theta + \rho), \quad (7)$$

где ρ – угол трения, $\operatorname{tg} \rho = \mu$.

С учетом (5) величина касательных напряжений равна

$$\tau = \frac{N}{\cos \rho} \cos(\theta + \rho) \left(\frac{a_1 b_1}{\sin \theta_1} + \frac{a_2 b_2}{\sin \theta_2} \right). \quad (8)$$

Угол θ_2 является функцией θ_1 , следовательно, значение касательных напряжений зависят

от него, продифференцировав уравнения (5), (6) и (8) по $d\theta_1$, получим выражение:

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1 + \sin \psi_1 \operatorname{tg} \rho \left(\frac{a_1 b_1}{\sin \theta_1} + \frac{a_2 b_2}{\sin \theta_2} \right) \frac{\sin \psi_1}{\sin^2 \psi_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1} + \operatorname{tg}\theta_1 \operatorname{tg} \rho - \sin \psi_1 \left(\frac{a_1 b_1}{\sin \theta_1} + \frac{a_2 b_2}{\sin \theta_2} \right) \frac{\sin \psi_2 \cos^3 \theta_2}{\sin^2 \psi_1 \cos^2 \theta_1}}{\sin^2 \theta_1} \cos \theta_1 + \frac{a_2 b_2}{\sin^2 \theta_2} \frac{\sin \psi_2 \cos^3 \theta_2}{\sin \psi_1 \cos^2 \theta_1} = 0. \quad (9)$$

Полный относительный сдвиг при одновременной работе двух режущих кромок будет равен:

$$\zeta = \sqrt{\zeta_B^2 + \zeta_{II}^2}. \quad (10)$$

По уравнениям (1) – (5), (9) и (10) можно сделать вывод, что при срезании металла резцами с двумя режущими кромками величина деформации слоя зависит от коэффициента трения μ , углов сбега стружки ψ_1 и ψ_2 и сечения срезаемых слоев $a_1 b_1$ и $a_2 b_2$. Интенсивность пластической деформации, главным образом, зависит от угла сбега стружки. Чем меньше угол сбега стружки, тем больше трение, а, следовательно, и деформация срезаемого слоя. Он возрастает с увеличением продольной и нормальной составляющих относительного сдвига.

При срезании слоя металла резцом с треугольным профилем стружка, наряду с давлением с передней поверхности, испытывает давление по смежным боковым поверхностям N , вследствие чего происходят дополнитель-

ные сдвиги вдоль режущих кромок по плоскости сдвига [1, 2].

В зависимости от величины дополнительных сдвигов происходит изменение направления схода стружки и углов ее сбега ψ_1 и ψ_2 .

$$\psi_2 = \varphi_1 + \varphi_2 - \psi_1, \quad (11)$$

$$\frac{C_1 b_1 a_1 \text{ctg}^{m_1} \psi_1}{\sin \theta_1 \sin \psi_1} = \frac{C_2 b_2 a_2 \text{ctg}^{m_2} (\varphi_1 + \varphi_2 - \psi_1)}{\sin \theta_2 \sin (\varphi_1 + \varphi_2 - \psi_1)}, \quad (12)$$

где C и m – величины, зависящие от обрабатываемого материала, деформации и других параметров [1].

Уравнения (11) и (12), нельзя использовать для определения углов ψ_1 и ψ_2 , так как неизвестны величины C и m , но они дают возможность оценить влияние параметров на направление схода стружки. Так, увеличение параметров среза одной из режущих кромок реза или уменьшение угла φ отклоняет стружку в направлении другой режущей кромки, что ведет к увеличению деформации срезаемого слоя.

При срезании слоев фасонным инструментом с несколькими режущими кромками направление схода стружки будет определяться формой режущего профиля и распределением сечения среза по нему. Если направление схода с одной из кромок составит маленький угол, то это вызовет повышение деформации срезаемого слоя, а значит и усиленный износ поверхности. Увеличение срезаемого слоя одной из кромок изменит направление схода стружки и улучшит условия резания на других участках, что повысит износостойкость инструмента (рис. 3).

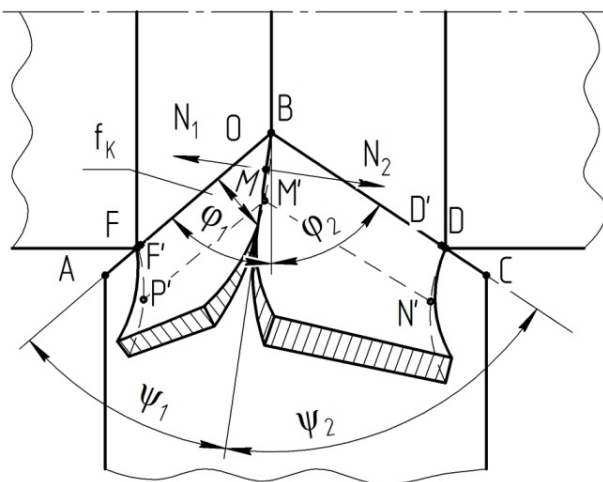


Рис. 3. Образование стружки при резании V-образным резцом

Если металл при резании переходит в стружку только путем сдвига, то стружка будет иметь монолитный вид. В результате давления N_1 смежных сегментов стружек друг на друга сдвиг осуществляется также вдоль режущих кромок.

Монолитной стружка будет только в случае, когда возникшее под действием давления N_1 нормальное напряжение σ окажется меньше предела текучести σ_T :

$$\sigma = \frac{C_1 b_1 \text{ctg}^{m_1} \psi_1}{f_K K_1 \sin \theta_1}, \quad (13)$$

где f_K – ширина контакта стружки с передней поверхностью реза.

При превышении предела текучести возникает смятие, изменяющее вид стружки и другие параметры, такие как коэффициент усадки и неравномерность усадки по ширине. Сила N_1 приложена в точке O . Смежные боковые поверхности стружки оказывают давление по площади $BMM'B'$, после прекращения контакта с передней поверхностью элементы стружки начинают завиваться в спираль и давление на них прекращается.

Учитывая, что резец с $\gamma = 0^\circ$, то $K_1 = \text{ctg} \theta_1$, и угол $\theta_1 \leq 20^\circ$, а значит $K_1 \sin \theta_1 \approx 1$, то выражение (13) для определения величины нормальных напряжений на смежных боковых поверхностях [1] может быть приведено к виду:

$$\sigma = \frac{C_1 b_1 \text{ctg}^{m_1} \psi_1}{f_K}. \quad (14)$$

Из выражения (12) следует, что одним из факторов, влияющих на величину нормальных напряжений σ , является f_K – ширина контакта стружки с передней поверхностью, направление схода стружки и ширина среза. В свою очередь ширина контакта f_K определяется толщиной срезаемого слоя и коэффициентом усадки (так же зависящего от ряда факторов – геометрии инструмента, скорости резания, свойств материала, типа применяемой СОЖ и др.). Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что определяющими факторами при нахождении нормальных напряжений являются ширина срезаемого слоя и направление схода стружки.

При увеличении ширины срезаемого слоя b или уменьшении угла сбега стружки ψ нормальные напряжения σ начинают возрастать. При $\sigma > \sigma_T$ металл начинает течь, вследствие чего в стружке появляется разрыв по смеж-

ным поверхностям. При резании металла резцом с углом $\varphi_1 = \varphi_2 = 45^\circ$ при глубине резания 2 мм была получена монолитная стружка. При параметрах резца $\varphi_1 = \varphi_2 = 20^\circ$ и при глубине резания 4 мм стружка имеет разрыв. Целью проведенных экспериментов являлось определение факторов, наиболее интенсивно влияющих на величины деформаций срезаемого слоя и оценка самих величин деформаций.

Эксперимент проводился на токарно-винторезном станке трапецеидальным резцом. Резание осуществлялось с радиальной подачей, при этом изменялась подача и применялись резцы с различными углами в плане и длиной вершинной кромки. Срезание слоев металла производилось двумя и тремя режущими кромками. По мере врезания ширина

срезаемого слоя вершинной кромкой оставалась неизменной, а ширина, срезаемая боковыми кромками, увеличивалась. Глубина резания составляла от 1 до 7 мм.

Полученная стружка измерялась на инструментальном микроскопе, при этом контролировались следующие параметры: углы ψ_1 , ψ_2 и ψ_3 ; толщина стружки на наружных и внутренних поверхностях; ширина стружки по режущим кромкам. За параметры, характеризующие степень деформации, были приняты продольная составляющая относительного сдвига ζ_B и коэффициент поперечной усадки K . Эксперименты, проведенные с использованием резца с трапецеидальным профилем и углами $\varphi_1 = \varphi_2 = 20^\circ$ и ширине вершинной кромки 3 мм, представлены на рис. 4.

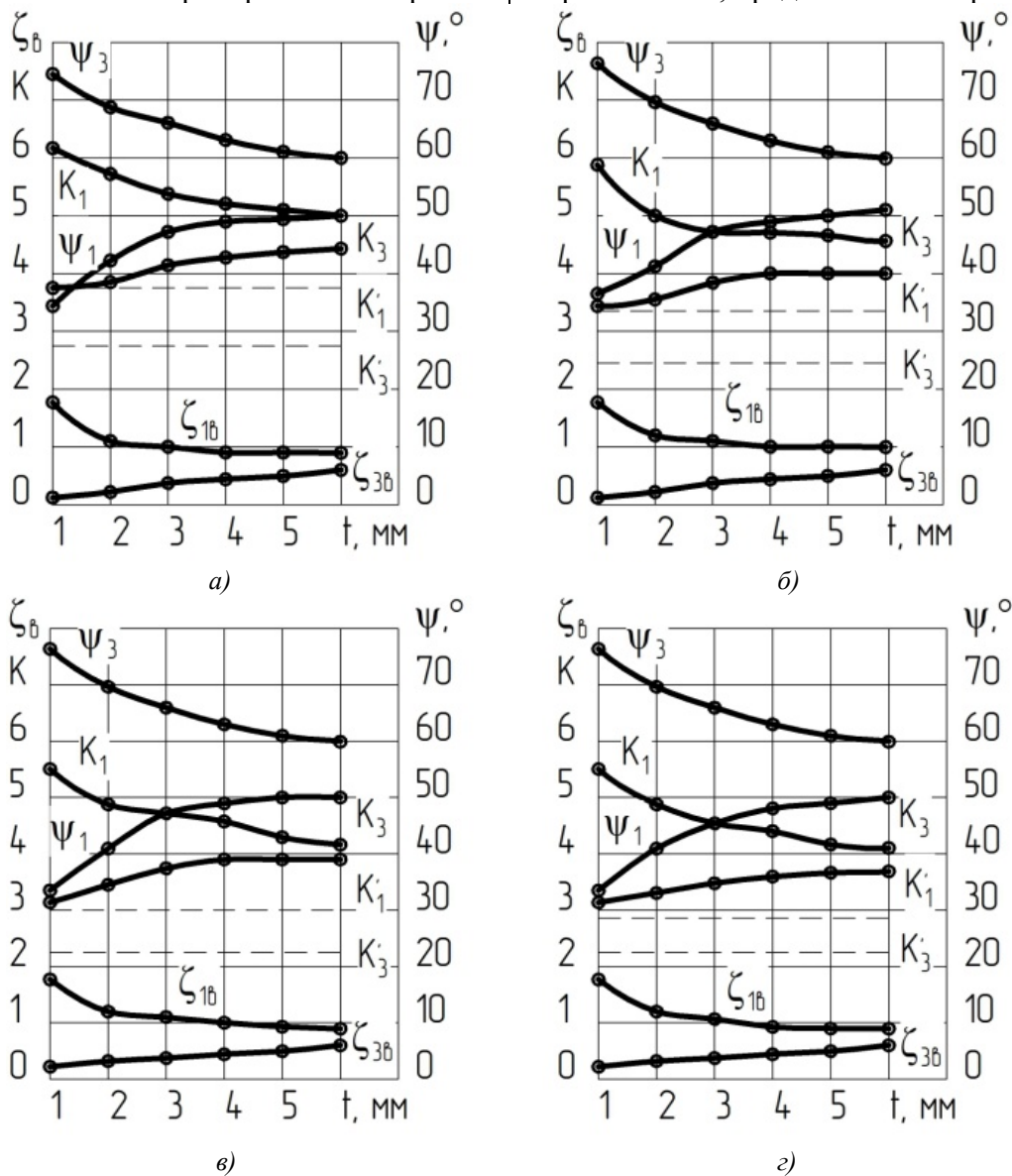


Рис. 4. Величина деформации срезаемых слоев вершинной и одной боковой кромкой резца при различной глубине резания:

$a - 0,1$ мм/об; $б - 0,14$ мм/об; $в - 0,20$ мм/об; $г - 0,25$ мм/об; K_1' – коэффициент поперечной усадки при свободном резании боковой кромкой, K_1 – вершинной

Из графиков видно, что с увеличением глубины резания или ширины слоя, которую срезают боковая режущая кромка, стружка начинает отклоняться к вершинной кромке, в связи с чем ζ_B и K_1 от боковой кромки уменьшаются, а от вершинной растут. С уменьшением угла схода стружки ψ увеличивается деформация срезаемого слоя. Деформация срезаемого слоя при резании несколькими режущими кромками всегда больше, чем при свободном резании, так как стружка при сходе отклоняется от перпендикуляра к режущей кромке. С увеличением подачи или толщины срезаемого слоя усадка будет снижаться, но медленнее

чем это наблюдается при свободном резании. Основным параметром, влияющим на степень деформации, является угол схода стружки ψ .

На рис. 5 изображены графики показывающие изменение деформации слоев, срезаемых тремя режущими кромками с длиной вершинной режущей кромки 3 мм.

На графиках показаны значения параметров ψ , ζ_B и K_1 от одной из боковых кромок. Кривые второй боковой кромки идентичны и поэтому не отображены. Стружка по вершинной кромке сходится по нормали к ней, для нее значения $\psi = 90^\circ$, $\zeta_B = 0^\circ$, для упрощения эти графики также не показаны.

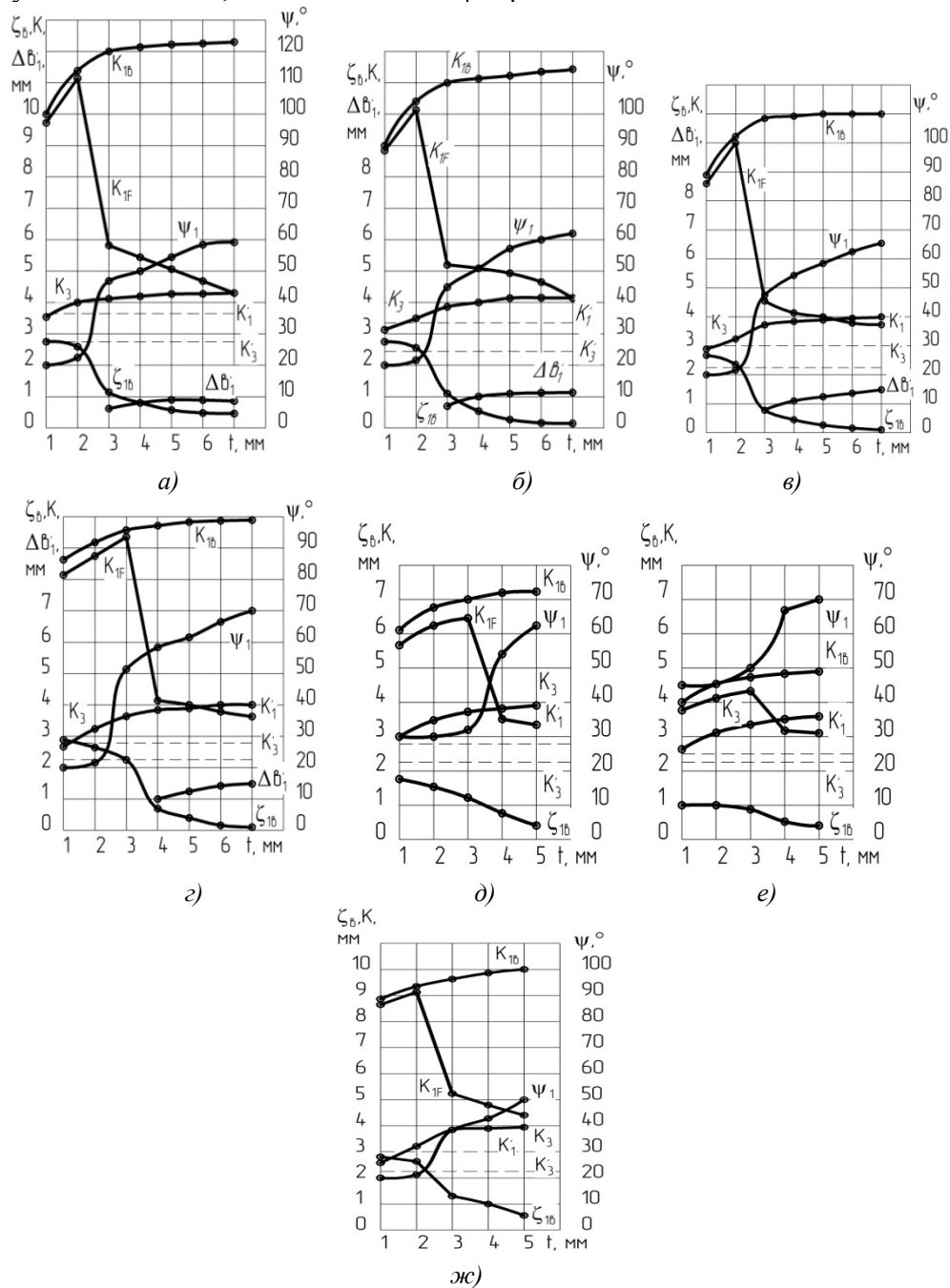


Рис. 5. Величина деформации слоев, срезаемых вершинной и двумя боковыми кромками резца при различной глубине резания

По графикам можно сделать следующие выводы: при срезании слоя до 2 мм стружка сходит под углом 90° к вершинной кромке. Деформация по ширине стружки от боковых кромок почти одинакова, стружка имеет монолитную структуру. Возрастает коэффициент усадки, что объясняется зависимостью коэффициента трения от величины срезаемого слоя. При дальнейшем увеличении глубины резания до 3 мм направление схода стружки резко меняется в сторону перпендикуляра к режущим кромкам, стружка меняет вид, на ней появляются разрывы по смежным поверхностям. Изменяется деформация по ширине стружки. Усадка стружки по наружной стороне снижается за счет уменьшения сдвига, а на смежной – продолжает расти из-за возросшей деформации сдвига и смятия смежных поверхностей.

Главной причиной износа задних поверхностей боковых режущих кромок является высокая степень деформации боковых слоев. При увеличении глубины резания до 7 мм слой, срезаемый вершинной кромкой, подвергается сильному сжатию вдоль кромки, сдвигу и смятию со стороны боковых кромок, что вызывается пересечением направлений схода стружки от боковых и вершинной кромок.

Деформация стружки, срезаемой многокромочным инструментом, всегда будет больше, чем при свободном резании. Наиболее тяжелыми участками являются те, что прилегают к смежным поверхностям стружки. Вследствие повышения деформации при работе многокромочного инструмента силы резания также будут выше, чем при свободном резании. Деформация снижается с увеличением подачи, а так же с ростом углов φ_1 и φ_2 , так же следует отметить, что при постоянной ширине срезаемого слоя деформация снижается сильнее. Длина вершинной кромки не оказывает влияния на степень деформации.

Полученные результаты практически были использованы при разработке технологии изготовления винтовых выступов на пуансонах для выдавливания винтовых канавок на внутренней поверхности трубчатых заготовок [1, 8 – 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков, Д.П., Маликов, А.А., Ямников, А.С. Формообразование многозаходных винтовых выступов на прессовой оправке: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. – 141 с.
2. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Повышение ресурса инструмента при нарезании усилен-

ной упорной резьбы на заготовках из высокопрочных материалов // –СТИН. – 2015. – №6. – С. 17–21.

3. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Причины неравномерного износа резьбовых резцов по упорной стороне профиля // Материалы XV ВНТК Механики XXI века. 2016. №15. БрГУ, Братск. С. 13–18.

4. A.S. Yamnikov and A.O. Chuprikov. Chucks for Thin - Walled Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research. Vol. 35 No. 11, 2015. pp. 838–840.

5. A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov and A. I. Khar'kov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-Strength Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956.

6. Ямников, А.С., Ямникова, О.А. Экспериментальное определение силы резания при фрезоточении резьбы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 82–93.

7. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Влияние переднего угла на усадку стружки при точении высокопрочных сталей // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации 2016. Матер. XVII Всероссийской НТК (г. Пермь, 17–18 ноября 2016 г.). ПНИПУ. С. 79–82.

8. Ямников, А.С., Волков, Д.П. Технологическое обеспечение качества винтовых прессовых оправок // Вестник машиностроения. –2016. – №3. – С. 55–58.

REFERENCES

1. Volkov, D.P., Malikov, A.A., Yamnikov, A.S. *Multiple-thread Screw Lug Shaping on Press Mandrel*: monograph. –Tula: Publishing House of TulSU. 2016. – pp. 141.

2. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. *Tool Life Increase at Threading Strengthened Buttress Thread on High-strength Blanks* // –СТИН. – 2015. – №6. – pp. 17–21.

3. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. Reasons for uneven wear of thread chasers on buttress profile side // *Proceedings of the XV-th ASTC Mechanics for the XXI-st Century*. 2016. №15. BrSU, Bratsk. pp. 13–18.

4. A.S. Yamnikov and A.O. Chuprikov. Chucks for Thin - Walled Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research. Vol. 35 No. 11, 2015. pp. 838–840.

5. A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov and A. I. Khar'kov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-Strength Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956.

6. Yamnikov, A.S., Yamnikova, O.A. Experimental definition of cutting force at thread milling // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2015. – № 1. – pp. 82–93.

7. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. Face angle impact upon chip shrinkage at high-strength steels // *Aerospace Engineering, Science Intensive Technologies and Innovations 2016. Proceedings of the XVII-th All-Russian ST Conf.* (November 17–18, 2016 Perm). PNIPU. pp. 79–82.

8. Yamnikov, A.S., Volkov, D.P. Engineering support of screw press mandrels // *Bulletin of Mechanical Engineering*. –2016. – №3. – pp. 55–58.

9. Yamnikov, A.S., Volkov, D.P. Manufacturing screw projections on punch stamp // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Techniques*. 2011. – № 4/3 (288). – pp. 99–104.

10. Volkov, D.P., Yamnikov, A.S. Complex technology for manufacturing screw press mandrels // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. Edition 11: in 2 Parts. – Tula: Publishing House of TulaSU, 2012. Part 1. – pp. 292–298.

Рецензент д.т.н. А.С. Янюшкин

УДК 621.91

DOI: 10.12737/article_592d14ddcb2a19.76456116

В.В. Клепиков, д.т.н.,

А.А. Черепакхин, к.т.н.

(Московский политехнический университет,
105023, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38)

E-mail: tkm1410@yandex.ru; prof_klepikov@mail.ru

Особенности облегающего шевингования цилиндрических зубчатых колес

Предложена методика определения геометрических параметров охватывающего шевра на основе расчета скоростей относительного движения инструмента и заготовки. На основе теории расчета направлений векторов относительной скорости на шевре разработаны конструкции шевров с наклонными и прямыми стружечными канавками. Рассмотрены варианты расположения стружечных канавок для различных условий шевингования.

Ключевые слова: охватывающий шевр; стружечная канавка; относительная скорость движения.

V.V. Klepikov, D. Eng.,

A.A. Cherepakhin, Can. Eng.

(Moscow Polytechnic University, 38, B. Semyonovskaya Str., Moscow 105023)

Peculiarities in easy spur cog-wheel shaving

A procedure for the definition of female shaver geometrics on the basis of the computation for relative motion velocities of a tool and a blank is offered. On the basis of the theory for the vector direction computation of a relative velocity on a shaver there are developed designs of shavers with sloping and upright chip grooves. Options for chip groove locations for different conditions of shaving are considered.

Keywords: female shaver; chip groove; relative velocity of motion.

Зацепление классического шевра с обрабатываемым венцом имеет точечный контакт, что требует перемещения точки скрещивания осей шевра и обрабатываемого колеса вдоль зубчатого венца. Для исключения этого перемещения, а, следовательно, упрощения кинематической схемы станка с одновременным повышением жесткости упругой технологической системы необходим линейный характер контакта [1, 2]. Шевр с линейным контактом получил название «Облегающий шевр» (рис. 1).

Достоинством обработки зубчатых венцов облегающим шевром является уменьшение машинного времени и отсутствие дополнительного движения продольной подачи [3]. При этом возможно получение бочкообразной формы зуба, как и при классическом шевинговании.

При внедрении облегающего шевингования основным сдерживающим фактором является

трудность профилирования зуба шевра, так как боковая поверхность зуба облегающего шевра не является эвольвентной, а сам зуб имеет ярко выраженную седлообразность Δ_1 , Δ_2 [4].

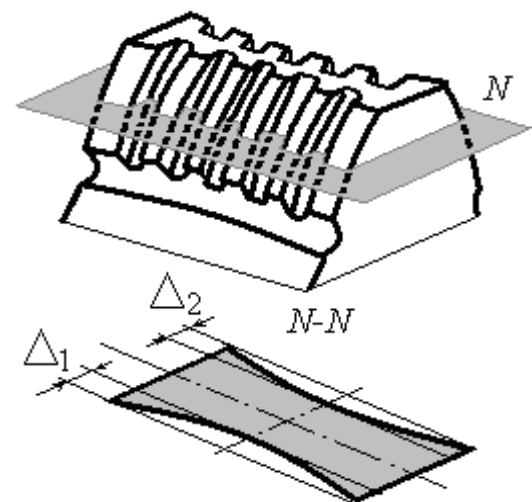


Рис. 1. Сечение зуба облегающего шевра

Определение геометрических параметров шевров является достаточно сложной задачей, определяемой на основе математических модулей станочного зацепления при шевинговании. При этом в целях упрощения расчетов целесообразно использовать имеющиеся данные о скорости относительного движения инструмента и заготовки [5, 6].

Скорость относительного движения при взаимодействии поверхностей зубьев инструмента и колеса представляет собой скорость резания при шевинговании. Обеспечение требуемой точности и качества обработки при шевинговании (в частности высокое качество обрабатываемой поверхности зуба колеса) в значительной мере зависит от величины и направления относительной скорости в зацеплении колесо–инструмент $V_{к.и}$. При этом необходимо обеспечить постоянство угла между направлением вектора этой скорости и направлением режущей кромки [5].

Изменение этого угла в процессе обработки приводит к следующим последствиям:

- колебанию шероховатости обработанной поверхности;
- неравномерности толщины срезаемого слоя на равных участках, вызывающей значительные отклонения от расчетной геометрии поверхности зуба колеса;
- неравномерной деформации зубьев обработанного венца за счет колебаний остаточных напряжений и толщины наклепанного слоя.

Таким образом, для правильного выбора геометрии режущих элементов инструмента следует знать соотношение между относительными скоростями и направлениями их векторов в различных точках поверхности зуба (рис. 2, 3, 4).

Вектор скорости относительного движения в контактной точке определяется выражением:

$$\vec{V}_{и.к} = \vec{V}_и + \vec{V}_к, \quad (1)$$

где $V_{и.к}$ – вектор скорости относительного движения в контактной точке; $V_и$ – вектор скорости движения в контактной точке инструмента; $V_к$ – вектор скорости движения в контактной точке колеса (зуба нарезаемого венца).

Проекции скорости относительного движения в системе координат определяются выражениями:

$$\begin{aligned} V_{и.к}^s &= V_{и.к}^{и.х} \cos \alpha_{wi} - V_{и.к}^{и.у} \sin \alpha_{wi} \cdot \cos \beta_{иi} + \\ &+ V_{и.к}^{и.з} \sin \beta_{иi} \cdot \sin \alpha_{wi}; \\ V_{и.к}^n &= V_{и.к}^{и.х} \sin \alpha_{wi} - V_{и.к}^{и.у} \cos \beta_{иi} + \\ &+ V_{и.к}^{и.з} \cdot \sin \beta_{иi} \cdot \cos \alpha_{wi}; \\ V_{и.к}^\tau &= V_{и.к}^{и.х} \sin \beta_{иi} + V_{и.к}^{и.з} \cos \beta_{иi}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $V_{и.к}^\tau$ – продольная скорость относительного движения поверхностей инструмента и колеса; $V_{и.к}^s$ – продольная скорость относительного движения; $V_{и.к}^n$ – нормальная скорость относительного движения.

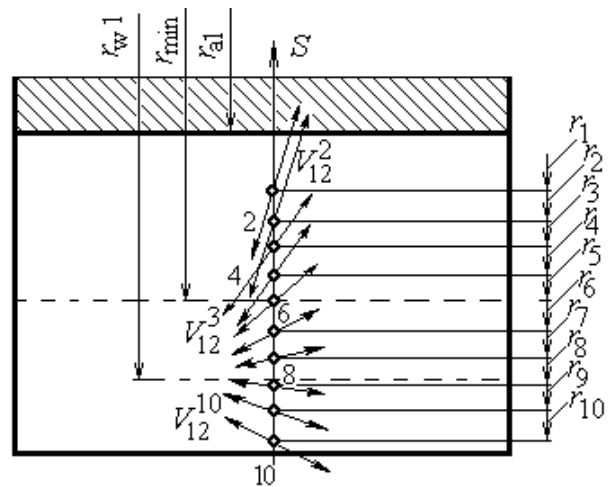


Рис. 2. Распределение векторов относительной скорости ($V_{1,2}$) на шевере

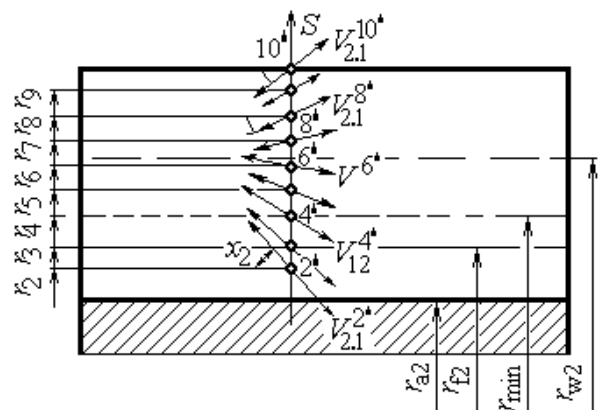


Рис. 3. Распределение векторов относительной скорости ($V_{2,1}$) на обрабатываемом венце

Учитывая отсутствие внедрения зубьев, имеем $V_{и.к}^n = 0$. Таким образом, вектор полной скорости относительного движения может быть представлен выражением:

$$V_{и.к.}^n = \sqrt{(V_{\Sigma_{и.к.}}^{\tau})^2 + (V_{и.к.}^s)^2} \quad (3)$$

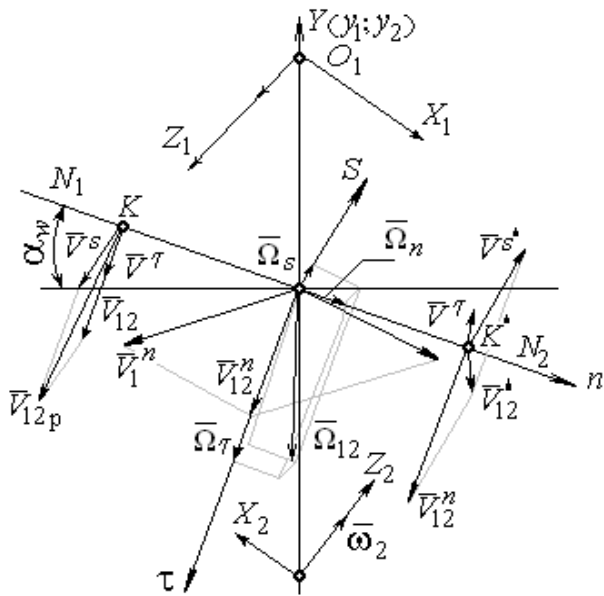


Рис. 4. Распределение скорости относительного движения взаимодействующих поверхностей зубьев шевера и обрабатываемого венца

При анализе принятой схемы обработки необходимо учесть технологические особенности получения главных поверхностей сопрягаемых колёс. Поэтому при теоретическом анализе принятой схемы обработки необходимо учитывать следующие особенности:

- в зацеплении инструмента с обрабатываемым колесом имеет место квазилинейный контакт зубьев;
- главные поверхности зубьев колеса и инструмента образованы в общем случае разными производящими поверхностями;
- в процессе обработки изменяются геометрические параметры схемы зацепления, связанные с непрерывным съемом металла и наличием радиальной и продольной подачи;
- главные поверхности зубьев колеса формируются окончательно как огибающие семейства производящих линий (режущих кромок) при двухпараметрическом взаимоогибании главных поверхностей зубьев инструмента и обрабатываемого колеса.

Приведем значения кинематических параметров станочного зацепления, отнесенных к шевру (табл. 1) и к колесу (табл. 2).

На основе теории расчета направлений векторов относительной скорости на шевре создана новая конструкция шевера с наклонными и прямыми стружечными канавками.

На боковых поверхностях зуба шевера

стружечные канавки расположены веерообразно с различными схемами расположения (рис. 5).

1. Значения кинематических параметров станочного зацепления, отнесенных к шевру

№	r_u	V^s	$V_{и.к.}^n + V^{\tau}$	V	X
	мм	мм/с	мм/с	мм/с	град.
1	101,75	-879,3	287,1	925,0	-71,9
2	102,0	2779,4	297,9	834,4	-69,1
3	103,0	-549,7	322,9	637,6	-59,6
4	104,0	-3952	339,7	521,1	-49,3
5	105,0	-269,6	353,4	445,5	-37,3
6	106,0	-160,7	365,2	399,0	-23,8
7	107,0	-62,8	375,9	381,1	-9,5
8	108,0	26,8	385,7	386,6	4,0
9	109,0	110,4	394,8	410,0	15,6
10	110,0	189,1	403,4	445,4	25,1

2. Значения кинематических параметров станочного зацепления, отнесенных к колесу

№	r_u	V^s	$V_{и.к.}^n + V^{\tau}$	V	X
	мм	мм/с	мм/с	мм/с	град.
1	77,0	773,6	467,0	903,6	58,9
2	78,0	500,7	437,2	664,7	48,9
3	79,0	345,3	420,3	544,0	39,4
4	80,0	222,8	407,0	464,0	28,7
5	81,0	117,8	395,6	412,0	16,6
6	82,0	24,1	385,4	386,1	3,6
7	83,0	-61,7	376,0	381,0	-9,3
8	84,0	-141,3	367,3	393,6	-21,0
9	85,0	-216,3	359,2	419,3	-31,1

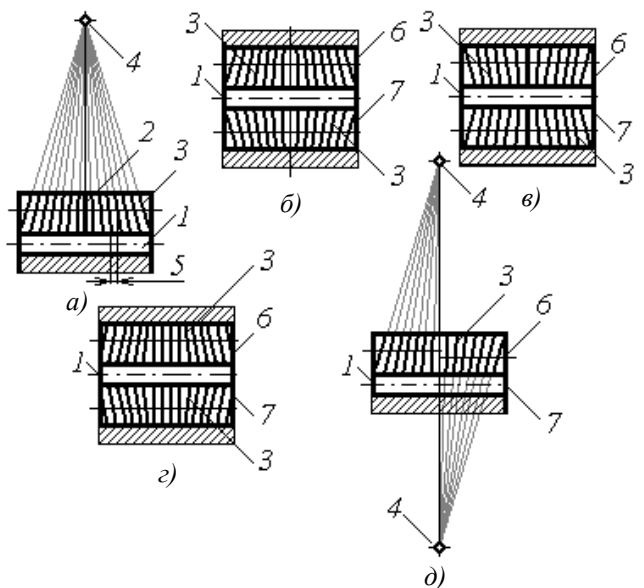


Рис. 5. Шевр с наклонными и прямыми стружечными канавками:

1 – зуб шевера; 2, 3 – прямая и наклонная стружечные канавки; 4 – центр образования веера; 5 – шаг стружечной канавки; 6, 7 – боковые поверхности зуба шевера

На боковой поверхности профиля зуба 1 расположена прямая стружечная канавка 2 и наклонные стружечные канавки 3, выполненные веерообразно. При этом наклонные канавки имеют углы наклона, постепенно увеличивающиеся к краям шевера (рис. 5, а). Центр образования веера 4 лежит на линии, проходящей через прямую стружечную канавку 2. На линии делительного цилиндра стружечные канавки выполнены с постоянным шагом 5. При этом стружечные канавки 3 на боковых сторонах 6 и 7 зуба 1 выполнены веером, расходящимся от головки к ножке зуба на обеих сторонах и наоборот (рис. 5, б).

При необходимости осуществления процесса зубошевингования в пределах одного цикла обработки с реверсом или без реверса на боковых сторонах 6 и 7 зуба 1 стружечные канавки 3 на одной половине боковой поверхности профиля зуба расположены веером, расходящимся от головки к ножке зуба, а на другой поверхности профиля зуба стружечные канавки 3 расположены веером, расходящимся от ножки к головке зуба (рис. 5, в).

Как известно, головка зуба шевера имеет наибольший путь резания, а, следовательно, и максимальный износ.

В схеме выполнения стружечных канавок шевера веерообразно обеспечено постоянство требуемого угла 90° между вектором относительной скорости и направлением режущей кромки стружечной канавки путем аппроксимации наклонной стружечной канавки в области, где наиболее сложные условия резания, а именно на головке зуба шевера. При этом оптимизируется каждая средняя наклонная стружечная канавка в обеих частях зуба, расположенных по обе стороны от прямой канавки.

Различный наклон стружечных канавок в пределах одной стороны зуба шевера позволяет обеспечить благоприятные условия на головке зуба шевера как при резании в одном, так и в другом направлении. Такая схема расположения стружечных канавок позволяет шевинговать зубья зубчатых секторов поворотом шевера на угол, соответствующий обрабатываемому сектору.

Схема расположения стружечных канавок, показанная на рис. 5, г, предназначена для шевингования колес без реверса, так как противоположное расположение вееров стружечных канавок на правой и левой сторонах зуба шевера позволяет обеспечить равные условия резания на ведущих сторонах зубьев колеса.

Для случая обработки зубчатых колес с малым числом зубьев целесообразно применение схемы расположения стружечных канавок (рис. 5, д).

В начальный момент врезания режущих кромок стружечных канавок, например, левой половины веера шевера в боковую поверхность профиля зуба колеса одновременно несколько режущих кромок вступают в работу, перекрывая друг друга, постепенно увеличивая площадь контакта зубьев шевера и колеса в процессе обработки и числа режущих кромок, одновременно участвующих в процессе резания, компенсируют это отрицательное влияние неравных контактных напряжений, вызывающих перекося осей шевера и колеса.

Плавное врезание режущих кромок стружечных канавок значительно уменьшает перекося осей шевера и колеса. При этом обеспечивается повышение качества обработки, так как шевер постепенно входит в зацепление с обрабатываемым колесом. Припуск с таким расположением стружечных канавок снимается равномерно и длина резания каждой режущей кромки короче, чем при расположении стружечных канавок с повторяющимся сочетанием прямых и наклонных канавок. Таким образом, нагрузка на режущие кромки стружечных канавок уменьшается.

В конечный момент зацепления шевера с колесом используется правая половина веера шевера. При этом обеспечивается разгрузка режущих кромок стружечных канавок при выходе шевера из зацепления. Уменьшение нагрузки на режущие кромки при выходе шевера объясняется увеличенной степенью перекрытия режущих кромок в процессе резания. Равномерная нагрузка режущих кромок в процессе резания в зоне начальной окружности обеспечивается постоянством шага стружечных канавок на линии делительного цилиндра. Уменьшение нагрузки на режущие кромки стружечных канавок приводит к уменьшению износа режущих кромок шевера.

Выводы

Применение облегающего шевингования позволяет:

- уменьшить машинное время обработки;
- повысить жесткость упругой технологической системы за счет исключения дополнительного движения продольной подачи;
- получить бочкообразный зуб, не применяя качательного движения подачи шевера.

Предлагаемая методика расчета соотношений между относительными скоростями и направлениями их векторов в различных точках поверхности зуба позволяет обеспечить постоянство угла между направлением вектора скорости в зацеплении «колесо-инструмент» и направлением режущей кромки, что в свою очередь позволяет выбрать:

- форму контакта зубьев инструмента и заготовки;
- схему расположения стружечных канавок инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калашников, А.С. Передовые технологии изготовления зубчатых колес // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 11. – С. 44 – 51.
2. Клепиков, В.В., Солоницын, Б.М. Повышение технологических возможностей процесса чистовой обработки зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 47 – 49.
3. Параметрическая оптимизация обработки зубчатых колес. Монография: Виноградов В.М., Черепакхин А.А., Клепиков В.В./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. – 230 с.
4. Клепиков, В.В., Черепакхин, А.А. Влияние метода формообразования зубьев на форму припуска под зубоотделочные операции и их точность // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 3(57). С. 35 – 39.
5. Солоницын, Б.М., Клепиков, В.В. Совершенствование способа зубошевингования цилиндрических колес

облегающими шеверами // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 3. – С. 59 – 53.

6. Солоницын, Б.М., Клепиков, В.В. Повышение качества и производительности процесса шевингования зубчатых колес // Вестник машиностроения. – 2008. – № 10. – С. 54 – 55 с.

REFERENCES

1. Kalashnikov, A.S. Efficient technologies in manufacturing cog-wheels // *Reference Book. Engineering Journal.* – 2012. – № 11. – pp. 44 – 51.
2. Klepikov, V.V., Solonitsyn, B.M. Technological potentialities increase in cog-wheel finishing // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2005. – № 11. – pp. 47 – 49.
3. *Parametric Optimization in Cog-Wheel Machining.* Monograph: Vinogradov V.M., Cherepakhin A.A., Klepikov V.V./ Deutschland, Saarbrücken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. – pp. 230.
4. Klepikov, V.V., Cherepakhin, A.A. Impact of teeth shaping method upon allowance form for teeth finishing operations and their accuracy // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2016. – № 3(57). pp. 35 – 39.
5. Solonitsyn, B.M., Klyopikov, V.V. Up-dating of method for teeth shaving of spur cog-wheels with female shavers // *Tractors and Agricultural Machinery.* – 2010. – № 3. – pp. 59 – 53.
6. Solonitsyn, B.M., Klepikov, V.V. Quality and efficiency increase in cog-wheel shaving // *Bulletin of Mechanical Engineering.* – 2008. – № 10. – pp. 54 – 55.

Рецензент д.т.н. Г.А. Харламов

УДК 621.941

DOI: 10.12737/article_592d151f08adf1.59398484

Е.В. Пашков, д.т.н.,
 А.А. Вожгов, старший преподаватель
 (ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет,
 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)
 E-mail: 0506773532@mail.ru

Моделирование процесса двурезцового точения фасонных поверхностей

Приведен анализ технологической схемы двурезцового фасонного точения. Рассмотрена неустойчивая форма колебаний системы «резец–заготовка» в процессе фасонного точения. Представлены зависимости позволяющие оценить величины колебаний при обработке. Приведен ряд экспериментальных исследований, подтверждающих теоретические предположения.

Ключевые слова: двурезцовое точение; фасонная поверхность; колебания; качество поверхности; эффективность процесса.

Process simulation of profiled surface two-cutter turning

The analysis of a technological system for two-cutter profile turning is shown. An unstable form of oscillations in the “cutter-blank” system in the course of profile turning is considered. The dependencies allowing the estimation of an oscillation value at machining are shown. Some experimental investigations confirming theoretical assumptions are shown.

Keywords: two-cutter turning; profile surface; oscillations; surface quality; process efficiency.

Контактные устройства, так называемые электрические контакты, бывают скользящие, разрывные (разъемные) и постоянные. Они применяются для передачи токов различной силы и, в зависимости от этого, получили название слаботочные и сильноточные. Особенно в тяжелых условиях работают скользящие контакты, так как на их рабочих поверхностях помимо эрозионного изнашивания, возникающего при прохождении электрического тока, происходит износ под действием сил трения. Наложение этих двух видов изнашивания приводит к резкому снижению долговечности и надежности контактов.

Особое место среди электрических контактов занимают слаботочные скользящие контакты, которые получили широкое применение в системах управления авиационной, космической, судовой техникой, средствами автоматизации промышленного производства. Сложность решения триботехнических задач при работе скользящих электрических контактов обусловлена действием электрического тока, приводящего к ужесточению условий внешнего трения и износа.

Основным элементом, определяющим надежность работы щеточно-коллекторного узла, являются слаботочные скользящие контакты, назначение которых заключается в передаче без искажения электрического сигнала от подвижных элементов к неподвижным. Слаботочные скользящие контакты состоят из цилиндрического коллектора и щеток. Большую группу коллекторных токосъемных колец можно отнести к группе колец с фасонными канавками (рис.1).

Миниатюризация размеров конструкций слаботочных скользящих контактов связана, в первую очередь, с экономией благородных металлов, уменьшением массы и размеров контактных узлов микромашин и приборов. Другой причиной миниатюризации конструкции явля-

ется поиск оптимальных условий контактирования и эксплуатационных параметров, повышающих надежность и долговечность слаботочных скользящих контактов.

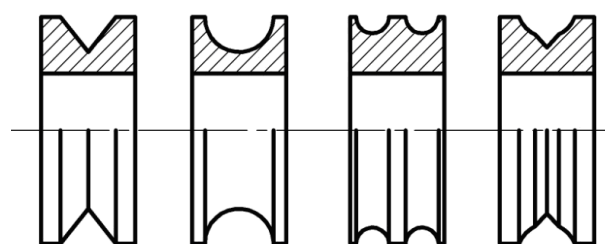


Рис. 1. Форма колец слаботочных скользящих контактов

При уменьшении их размеров удорожается и их изготовление, увеличивается количество брака, а из-за отсутствия приборов и методов контроля характеристик качества поверхности, значительно снижается объективность оценки надежности и долговечности работы контактов.

На основе анализа зависимостей, определяющих характеристики шероховатости при фасонном точении профильных канавок, можно сделать вывод, что параметры шероховатости в процессе обработки с использованием рекомендованных режимов резания формируются в зависимости от шероховатости задней поверхности резца и параметров (колебаний) режущего инструмента и заготовки в процессе обработки.

Операция фасонного точения профильных канавок выполняется на специальных токарных станках повышенной точности, налаженных на отдельные операции. Число возможных конструкторских наладок специальных токарных станков бесконечно, т.к. зависит, в первую очередь, от большого многообразия обрабатываемых деталей, от множества вариантов форм и размеров деталей.

В результате обработки канавки двумя резцами одновременно можно свести к минимуму негативное влияние деформаций. Это способствует повышению точности и уменьшению вы-

соты микронеровностей обработанной поверхности.

Одним из решений является вариант обработки, основанный на противоположном размещении двух резцов. В этом случае процесс деления подачи между резцами будет выполняться автоматически при любых численных значениях величины подачи, т.к. один резец всегда будет отставать от другого в направлении вращения на половину оборота. При этом обеспечивается высокая производительность обработки и значительно упрощается заточка и настройка резцов.

На практике данный метод может быть реализован двумя принципиально различными вариантами. Реализация метода предполагает последовательное расположение двух резцов друг за другом. При этом второй резец может работать параллельно с первым либо вступать в работу на завершающем этапе обработки первого резца. В связи с изложенным, первый вариант обработки, даже при одинаковой подаче по производительности, практически не будет отличаться от обычного однорезцового точения.

Если при этом настроить в статике оба резца на один и тот же размер обработки, то в результате увеличенных упругих отжатий в сечении первого резца, второй резец будет снимать не только неровности обработанной первым резцом поверхности, но будет также срезать и часть оставленного (в связи с отжатиями первого резца) припуска на обработку. В этом случае обработка будет происходить как при обычном последовательном двурезцовом точении только с уменьшенной площадью резания на первом резце.

Известно, что износ резцов, точность обработки и шероховатость поверхности в значительной степени зависят от виброустойчивости технологической системы [1, 2], увеличение которой способствует повышению производительности обработки.

В процессе фасонного точения неустойчивая форма колебаний чаще всего представляет собой колебания системы «резец–заготовка». Предшествующими исследованиями показано [3], что для описания подобных колебаний системы достаточно ограничиться одной степенью свободы в направлении действия вектора равнодействующей силы $P_{zy} = P_z + P_y$. Поэтому, в работе принята расчетная схема с одной сосре-

доточенной приведенной массой и одной степенью свободы.

В процессе колебательного движения на систему будут действовать следующие силы: сила инерции; восстанавливающая сила, равная силе упругости; сила вязкого сопротивления; а также внешняя сила $P(\tau)$, которая представляет собой некоторую функцию от времени τ .

Дифференциальное уравнение движения системы может быть записано в виде [4]:

$$M \frac{d^2 y}{d\tau^2} + H \frac{dy}{d\tau} + Cy = P(\tau), \quad (1)$$

где M – приведенная масса системы; H – приведенное вязкое сопротивление; C – приведенная жесткость системы.

Решение дифференциального уравнения (1) движения системы при начальных условиях $y(0) = 0$ и $y'(0) = 0$ имеет вид:

$$y = \frac{1}{M \cdot f} \cdot \int_0^{\tau} P(u) \cdot e^{\lambda(\tau-u)} \cdot \sin f(\tau-u) du, \quad (2)$$

где $f = \sqrt{\frac{C}{M} - \frac{H^2}{4 \cdot M^2}}$ – собственная частота

колебаний системы; $\lambda = -\frac{H}{2M}$ – декремент за-

тухания колебаний; u – время, которое изменяется в пределах от $u = 0$ до $u = \tau$.

Примем, что внешняя сила $P_1(\tau)$ для одного резца изменяется во времени τ по следующему закону:

$$P_1(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin \omega t), \quad (3)$$

где ω – частота вращения шпинделя; K – коэффициент пропорциональности между силой резания и глубиной резания; t_{\min} – минимальная глубина резания; Δt – смещение припуска на обработку, определяемое как разность t_{\max} и t_{\min} .

Такой закон изменения внешней силы характерен для наиболее часто встречаемого в практике случая смещения оси предварительно обработанной заготовки в процессе последующей финишной обработки. В этом случае величина динамического смещения инструмента в любой момент обработки может быть определена по выражению

$$y_1 = \frac{1}{M \cdot f} \cdot \int_0^{\tau} \left(K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin \omega u) \right) \cdot e^{\lambda(\tau-u)} \cdot \sin f(\tau-u) du \quad (4)$$

или

$$y_1 = \frac{1}{M \cdot f} \cdot \left(K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \right) \cdot \frac{1}{\lambda^2 + f^2} \cdot \left(f + \lambda \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \sin(f \cdot \tau) - f \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \cos(f \cdot \tau) \right) + \frac{1}{M \cdot f} \cdot K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{1}{\lambda^4 + 2 \cdot \lambda^2 \cdot (\omega^2 + f^2) + (\omega^2 + f^2)^2} \times \left(2 \cdot \omega \cdot f \cdot \lambda \cdot \cos(\omega \cdot \tau) - f \cdot (\omega^2 - \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) + \omega \cdot (\omega^2 + \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(f \cdot \tau) + \lambda \cdot (\omega^2 + \lambda^2 + f^2) \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \cos(f \cdot \tau) \right) \quad (5)$$

В случае двурезцовой обработки внешняя сила для первого резца будет изменяться во времени аналогично, как и в случае однорезцовой обработки

$$P_1(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin(\omega \cdot \tau)) \quad (6)$$

Для второго резца, расположенного под углом 180° по отношению к первому, внешняя сила будет равна

$$P_2(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 + \sin(\omega \cdot \tau + 180^\circ)) \quad (7)$$

или

$$P_2(\tau) = K \cdot t_{\min} + K \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot (1 - \sin(\omega \cdot \tau)) \quad (8)$$

Так как векторы сил от обоих резцов направ-

лены противоположно друг другу, то суммарная внешняя сила, действующая на систему «резец – заготовка», в этом случае будет определяться разностью сил $P_1(\tau)$ и $P_2(\tau)$:

$$P_{1-2}(\tau) = P_1(\tau) - P_2(\tau), \quad (9)$$

или

$$P_{1-2}(\tau) = K \cdot \Delta t \cdot \sin(\omega \cdot \tau) \quad (10)$$

Тогда для двурезцового точения

$$y_{1-2} = \frac{1}{M \cdot f} \times \quad (11)$$

$$\times \int_0^\tau K \cdot \Delta t \cdot \sin(\omega \cdot u) \cdot e^{\lambda \cdot (\tau - u)} \cdot \sin f(\tau - u) du$$

или

$$y_{1-2} = \frac{1}{M \cdot f} \cdot K \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{\lambda^4 + 2 \cdot \lambda^2 \cdot (\omega^2 + f^2) + (\omega^2 + f^2)^2} \times \left(2 \cdot \omega \cdot f \cdot \lambda \cdot \cos(\omega \cdot \tau) - f \cdot (\omega^2 - \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) + \omega \cdot (\omega^2 + \lambda^2 - f^2) \cdot \sin(f \cdot \tau) + \lambda \cdot (\omega^2 + \lambda^2 + f^2) \cdot e^{\lambda \cdot \tau} \cdot \cos(f \cdot \tau) \right) \quad (12)$$

Из анализа приведенных формул (5) и (11) для y_1 и y_{1-2} , в случае двурезцовой обработки величина колебаний инструмента определяется не полным припуском на обработку, как это было при однорезцовом точении, а лишь величиной смещения припуска Δt , при этом колебания уменьшаются.

Выполненные исследования процесса фасонного точения канавок коллектора использованы при решении практических задач финишной обработки деталей на автоматизированном оборудовании рис. 2.

Сопоставление экспериментальных данных показывает, что шероховатость обработанной поверхности по сравнению с однорезцовой обработкой уменьшается в 1,5...2 раза. Несколько меньший эффект по сравнению с теоретически ожидаемым связан с тем, что шероховатость поверхности формируется не только в результате копирования геометрической формы и тра-

ектории движения инструмента, но в значительной мере зависит и от степени пластической деформации поверхностного слоя детали, которая при переходе к двурезцовой обработке практически не изменяется. Кроме того, на шероховатость поверхности оказывают влияние погрешности заточки и установки резцов.

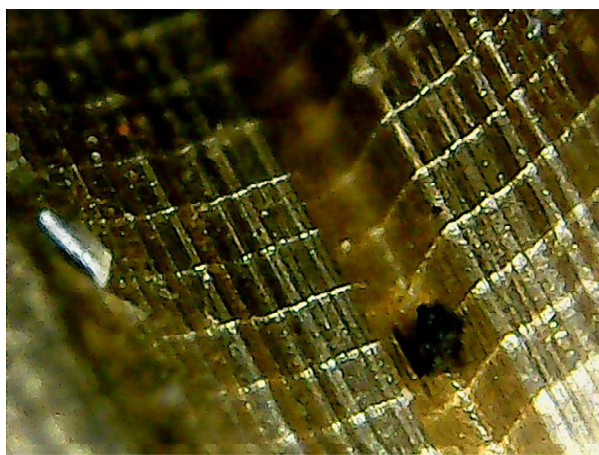
Для контроля шероховатости использовался 3D сканирующий Лазерный Рамановский спектрометр Confotec NR500, оснащенный объективом CF Plan APO 100x, NA = 0,95, цветной CCD камерой для микроскопа с высоким разрешением. Фрагмент исследования представлен на рис. 3.

Шероховатость обработанной поверхности зависит и от уровня изгибных колебаний инструмента. Снижение амплитуды изгибных колебаний способствует уменьшению величины относительного износа резцов и повышению их стойкости, а также оказывает положительное

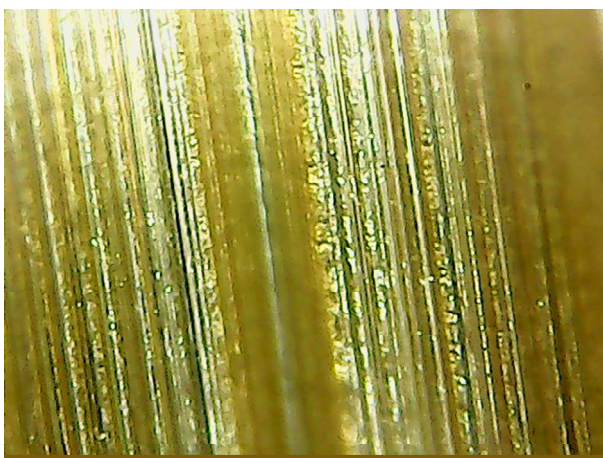
влияние на шероховатость обработанной поверхности. Измерение амплитуды изгибных колебаний инструмента выполнялось при скорости резания 60 м/мин, подача изменялась от 0,002 до 0,012 мм/об.



Рис. 2. Экспериментальное исследование двурезцового точения фасонных поверхностей



а)



б)

Рис. 3. Поверхность канавки (×500): а – точение фасонным резцом сложной формы; б – двурезцовое точение

Результаты измерений амплитуд колебаний в сопоставлении с величинами относительного износа резцов по задней поверхности на соответствующих режимах резания приведены в табл. 1.

1. Результаты экспериментальных исследований

Подача, мм/об	Однорезцовое фасонное точение		Двурезцовое фасонное точение	
	Относительный износ, мкм/км	Амплитуда колебаний, мкм	Относительный износ, мкм/км	Амплитуда колебаний, мкм
0,002	10	1,5	6,5	1,0
0,004	10	2,0	7,0	1,0
0,006	11	2,0	8,0	1,5
0,008	12	2,5	8,0	2,0
0,01	12	3,0	8,5	2,0
0,012	12	3,5	8,5	2,5

На основании результатов экспериментальных исследований, представленных в табл. 1, амплитуда изгибных колебаний резца в процессе резания увеличивается с повышением подачи. При любых значениях подачи амплитуда колебаний инструмента ниже в случае двурезцовой обработки. Это подтверждает приведенные выше теоретические выводы.

С результатами измерения амплитуд колебаний инструмента хорошо согласуются данные по величине относительного износа резцов на соответствующих режимах обработки. В случае двурезцового фасонного точения относительный износ резцов примерно в 1,5 раза ниже, чем при таких же режимах в случае однорезцовой обработки.

С увеличением подачи незначительно увеличивается относительный износ резцов как в случае однорезцового точения, так и в случае двурезцовой обработки.

Использование технологической схемы двурезцового фасонного точения может обеспечить существенное уменьшение шероховатости поверхности по сравнению с однорезцовым. Возможно повышение показателей точности формы продольного и поперечного сечений канавок, что подтверждает эффективность применения метода в условиях фасонного точения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маталин, А.А. Влияние вибраций системы СПИД и неравномерности припуска заготовки на качество поверхности при тонком растачивании / А.А. Маталин, К.В. Ломакин. – В кн.: Передовая технология и автоматизация управления

процессами обработки деталей машин. – Л.: Машиностроение, 1970. – С. 219 – 225.

2. **Вожжов, А.А.** Анализ особенностей расчета сил резания при точении с пилообразными колебаниями резца в радиальном направлении // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 139/2013. Серія: Машиноприладобудування та транспорт.* – Севастополь, 2013. С. 45 – 52.

3. **Вожжов, А.А., Худаймуратов, М.А.** Анализ относительных вынужденных колебаний инструмента и детали при фасонном точении // *Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастоп. гос. ун-т.* – Севастополь: СевГУ, 2016. Вып. 4. – С.10 – 20.

4. **Пашков, Е.В.** Технологические основы обработки точением тонкостенных цилиндрических деталей: учеб. пособие. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. – 425 с.

REFERENCES

1. Matalin, A.A. Impact of SPID system oscillations and allowance unevenness upon surface quality at fine boring / A.A. Matalin, K.V. Lomakin. – In the book: *Efficient Technology and Automation for Control of Machine Parts Machining.* – L.: Mechanical Engineering, 1970. – pp. 219 – 225.

2. Vozhzhov, A.A. Peculiarity analysis in computation of cutting forces at turning with cutter sawtooth oscillations in radial direction // *Bulletin of SevNTU: Proceedings, Edition 139/2013. Set: Mechanical Engineering and Transport.* – Sevastopol, 2013. pp. 45 – 52.

3. Vozhzhov, A.A., Khudaimuratov, M.A. Analysis of relative forced oscillations of a tool and a blank at profile turning // *Bulletin of Modern Technologies: Proceedings of Sevastopol State Uni. - Sevastopol: SevSU, 2016. Edition 4.* – pp.10 – 20.

4. Pashkov, E.V. *Technological Fundamentals in Thin-walled Cylindrical Parts Turning: Reference Book.* – Sevastopol: Publishing House of SevNTU, 2000. – pp. 425

Рецензент д.т.н. У.А. Абдулгазис

УДК 62-791.2

DOI: 10.12737/article_592d158d571ed7.95843767

В.В. Мелентьев, ведущий инженер

(ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33)

Е.И. Масленников, к.т.н., **К.Г. Порошин**, старший инженер, **О.В. Шибанов**, инженер (ОАО «ДжиЭс-Нанотех», 238051, Россия, Калининградская область, г. Гусев, ул. Индустриальная, 11)
E-mail: melentev.petrus@gmail.com; maslennikov@gsnanotech.com

Научно-технический датчик для вибродиагностики на базе технологии МЭМС и RFID

Представлен датчик для проведения вибродиагностики с МЭМС-акселерометром в качестве сенсора вибрации, а также рассматривается метод реализации датчика вибрации с беспроводной передачей данных и активацией с помощью RFID.

Ключевые слова: МЭМС; RFID; вибродиагностика; датчик вибрации.

V.V. Melentiev, Principal engineer,

(FSBEI HE “Petrozavodsk State University” (PetrSU), 33, Lenin Avenue, Petrozavodsk, Republik of Karelia 185910)

E.I. Maslennikov, Can. Eng., **K.G. Poroshin**, Senior engineer, **O.V. Shibanov**, Engineer (PC “JS-Nano-Tech”, 11, Industrialnaya Str., Gusev, Kaliningrad Region, Russia 238051)

Science intensive detector for vibration diagnostics based on MEMS and RFID technology

A detector for carrying out vibration diagnostics with MEMS – accelerometer as a vibration detector is presented, and a method for the realization of a vibration detector with a wireless data transfer and activation with the aid of RFID is also under consideration.

Keywords: MEMS; RFID; vibration diagnostics; vibration detector.

В современном мире в условиях жесткой рыночной конкуренции, компании стремятся минимизировать свои расходы и предотвратить попадание не качественной продукции потребителю, будь то товар или услуга. Для того чтобы качественно и в срок выполнять свои обязательства перед заказчиками во многих компаниях, для выполнения этой задачи, используется оборудование различного типа и назначения, причем это оборудование должно работать без внеплановых простоев.

Качество обрабатываемых деталей в значительной мере определяется вибрацией станков. Поэтому для вибрационной диагностики технологического оборудования и отдельных его элементов применяются различные датчики [1].

Современные комплексы для проведения вибродиагностики в качестве сенсора вибрации используют пьезоэлектрик. Датчик с пьезоэлектрическим преобразователем вибрации в электрический сигнал имеет относительно большие размеры и может измерять вибрацию только вдоль одной оси. Для получения более полной информации о степени развития дефектов необходимо измерять вибрацию в трех осях [2]. Чтобы измерить вибрацию в трех осях необходимо использовать три пьезоэлектрических преобразователя, но тогда и вес, и размеры датчика увеличиваются пропорционально. Для удобства, а иногда и для безопасности специалиста проводящего вибродиагностику, лучше использовать беспроводные датчики.

Беспроводные датчики делятся на стационарные и переносные. Переносные используются для мониторинга состояния обходным методом, стационарные монтируются на оборудование и производят мониторинг периодически через заданный интервал. В случае, когда оборудование долгое время не используется их нужно деактивировать и/или демонтировать.

Принимая во внимание все вышесказанное, был разработан датчик вибрации, использующий в качестве сенсора вибрации трехосный МЭМС-акселерометр [3] с беспроводной передачей данных от датчика на компьютер и активацией датчика с помощью RFID считывателя. Датчик можно использовать как в стационарном, так и переносном режиме. Общая схема датчика представлена на рис. 1.

Принцип действия датчика:

1. После изготовления и всех настроек дат-

чика его программно переводят в выключенный режим, при этом он потребляет не более 2 мкА. В таком состоянии он может находиться несколько лет.

2. После монтажа датчика на объект контроля его удаленно включают с помощью UHF RFID считывателя.

3. Датчик начинает свою работу:

- в стационарном режиме периодически проводя измерения вибрации и пересылая данные на компьютер с помощью УБПД (устройства беспроводной передачи данных);

- в переносном режиме проводя измерения вибрации и пересылая данные на компьютер с помощью УБПД, после чего переходит в выключенный режим и ожидает следующую команду на включение.

4. Компьютер анализирует полученные данные и сообщает результаты пользователю.

5. В случае если датчик используется в стационарном режиме, и появилась необходимость остановить объект контроля на длительный период (транспортировка, консервация), датчик программно переводят в выключенный режим.

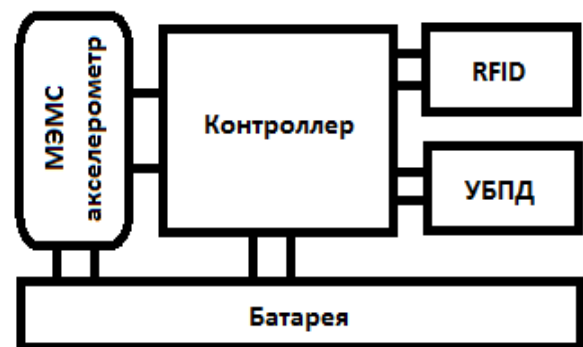


Рис. 1. Общая схема устройства датчика

Для проверки работоспособности датчика были проведены испытания по снятию спектральных характеристик вибрации на работающем оборудовании.

При проведении испытаний были достигнуты следующие параметры:

1. Частота дискретизации выбирается – 1,3кГц или 5,3кГц.
2. После преобразования сигнала с помощью БПФ количество линий в спектре – 1150.
3. Точность детектирующего ускорения в диапазоне измерения $\pm 2g$ при частоте дискретизации 1,3кГц – $\pm 9,6 \text{ мм/с}^2$; при 5,3 кГц – 153 мм/с^2 .

Пример временного сигнала получаемого с датчика изображен на рис. 2.

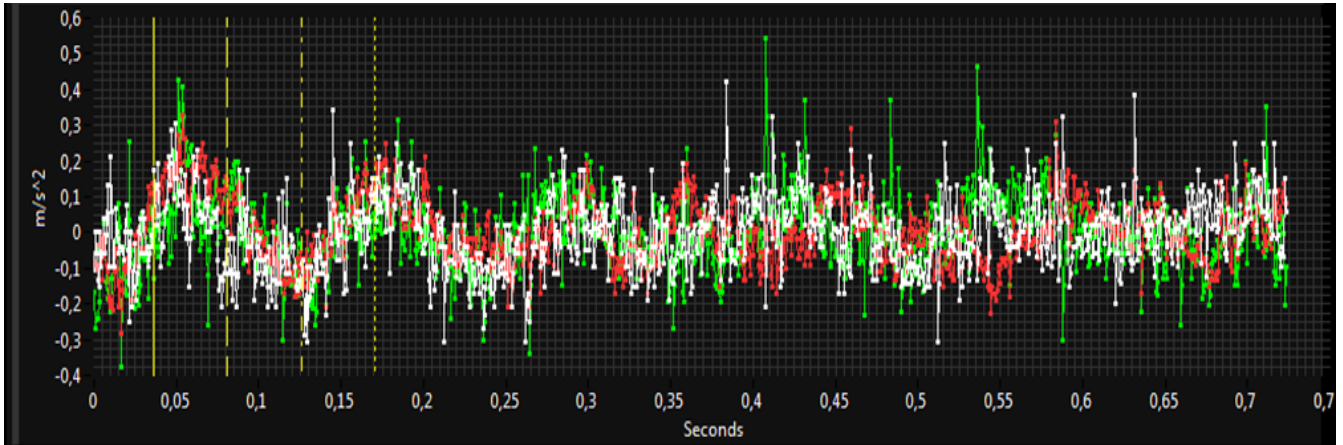


Рис. 2. Пример временного сигнала получаемого с датчика

В ходе проведения испытаний на работающем оборудовании были сняты показания виброускорений вблизи подшипников качения электродвигателей. При дальнейшей обработке данных был получен спектр виброскорости, в котором имелись характерные признаки дефектов на одном из подшипников. Обнару-

женные признаки указывали на следующие дефекты: износ наружного кольца; износ сепаратора.

После выявления данных дефектов, подшипник был разобран для подтверждения результатов диагностики. На рис. 3 представлены обнаруженные дефекты в подшипнике.

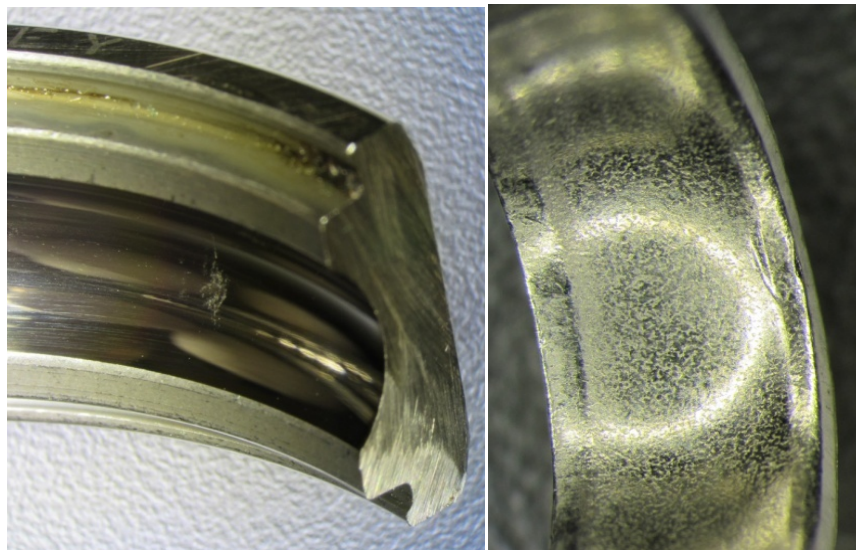


Рис. 3. Обнаруженные дефекты подшипника качения

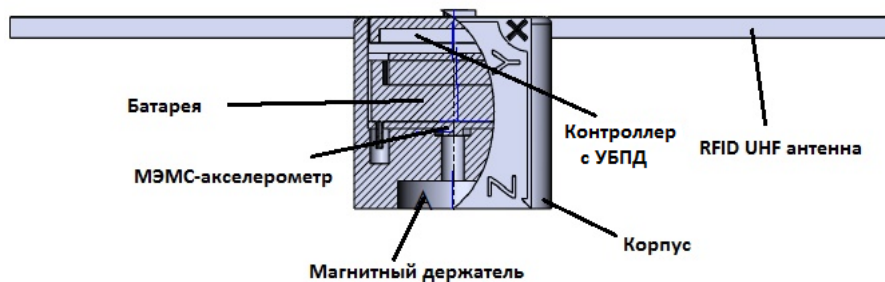


Рис. 4. Внешний вид датчика и его конструкция

Таким образом, достигается следующий результат:

1. Разработан датчик вибрации в компактном исполнении, размеры датчика не превышают 30×30×30 мм без антенны, а вес не более 50 г. Размер антенны 137×4×1 мм. Внешний вид датчика и его конструкция приведены на рис. 4.

2. Использование трехосного МЭМС-акселерометра позволяет контролировать вибрацию сразу по трем осям одновременно.

3. Беспроводное включение и передача данных позволяют увеличить комфортность и мобильность системы, а также дает возможность монтажа датчика на подвижные элементы оборудования.

Разработанный датчик может использоваться для диагностики состояния различных узлов оборудования такого как: фрезерные и токарные станки, насосы, компрессоры, вентиляторы и другое вращающееся оборудование. Помимо этого датчик можно использовать для оценки вибрации металлообрабатывающего инструмента [4]. Благодаря беспроводной активации и передачи данных, датчик может быть использован для диагностики линейных направляющих и гаек ШВП во время их работы, без демонтажа и длительной остановки оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дефекты подшипников качения // Практическая вибродиагностика и мониторинг [Электронный ресурс] URL: <http://www.tehnoinf.ru/vibrodiagnostika/49.html> (Дата обращения 11.03.2017).

2. ГОСТ ИСО 10816-1-97 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть I. Общие требования [Текст] Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 2 с.

3. Сыров, А. Датчики малых ускорений / А. Сыров // Компоненты и технологии. – 2010. – № 2. – С. 15 – 20.

4. Заковоротный, В.Л. Параметрические явления при управлении процессами обработки на станках // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – № 7 (68). – С. 52 – 61.

REFERENCES

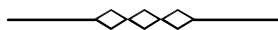
1. Frictionless bearing defects // *Practical Vibration Diagnostics and Monitoring* [Electronic resource] URL: <http://www.tehnoinf.ru/vibrodiagnostika/49.html> (Address Date 11.03.2017).

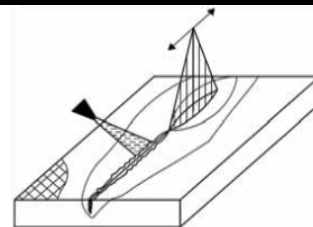
2. SRS ISO 10816-1-97 *Vibration. Machine State Control on Results of Vibration Measurements on Non-rotating Parts. Part I. General Requirements* [Text] Minsk: IPK Publishing House of Standards, 1998. – pp. 2.

3. Syrov, A. Small acceleration detectors / A. Syrov // *Components and Technologies*. – 2010. – № 2. – pp. 15 – 20.

4. Zakovorotny, V.L. Parametric phenomena at machining control on machines // *Bulletin of Don State Technical University*. – 2012. – № 7 (68). – pp. 52 – 61.

Рецензент д.т.н. А.П. Бабичев





УДК 678.067621.892

DOI: 10.12737/article_592d15da043ce6.63942104

**Ю.М. Зубарев, д.т.н.,
А.В. Приемышев, к.т.н.,
А.С. Заостровский, инженер**
(ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет Петра Великого
195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29)
E-mail: iuzubarev@mail.ru

Влияние режимов резания на выходные параметры процесса при обработке поликристаллических композиционных материалов

Рассмотрены особенности обработки резанием полимерных композиционных материалов. Предложены рекомендации по использованию различных материалов режущего инструмента, его геометрии и режимов обработки, что позволяет получить требуемое качество поверхности изделия.

Ключевые слова: обработка резанием; полимерные композиционные материалы; режущий инструмент; качество обработки.

**Yu.M. Zubarev, D. Eng.,
A.V. Priomyshchev, Can. Eng.,
A.S. Zaostrovsky, Engineer**
(FSAEI HE Peter the Great State University of Saint-Petersburg
29, Polytechnicheskaya Str., Saint-Petersburg 195251)

Cutting mode impact upon output process parameters at processing of polycrystalline composite materials

The peculiarities in polymeric composite material cutting are considered. The recommendations for use of different materials for cutters, their geometry and treatment modes are offered that allows obtaining the required quality of a product surface.

Keywords: cutting; polymeric composite materials; cutter; treatment quality.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) содержат неоднородные композиты, и процесс образования стружки при их обработке значительно отличается от обработки металлов резанием. Тем не менее, существуют некоторые общие аспекты, которые в той или иной степени достаточно схожи, как при обработке металлов, так и при обработке пластиков. Следовательно, теорию обработки металлов резанием можно применить и для обработки пластиков с определёнными поправками на особенность механической обработки резанием армированных материалов и с учё-

том влияния направления волокна при обработке ПКМ [9].

В результате при обработке ПКМ появляется присущая только им технологическая наследственность, и формируются эксплуатационные свойства, которые отличаются от свойств деталей машин, изготовленных из металлов [4].

Успешное внедрение деталей из ПКМ в машиностроение зависит не только от технологий создания и механических свойств ПКМ, но, главным образом, от возможности их механической обработки с соблюдением требо-

ваний по точности и качеству поверхностей изделий.

Проблемы механической обработки связаны с особенностями процесса резания двух составляющих: непластичной (армирующие волокна) и пластичной – основа. Материал ещё до сих пор мало изучен, а его свойства представляют собой уникальную композицию физических, химических, механических и других свойств. Точность обработки и качество поверхности изделия во многом зависят от финишной механической обработки [8].

Полимерные композиционные материалы – это не однородные материалы, а состоящие из многих составляющих и различных фаз. Армирующие волокна прочные и хрупкие, как, например, с арамидными и стекловолокнами, и обладают низкой теплопроводностью. С другой стороны, полимерная матрица не прочная и, в определённой степени, относительно армирующего материала, пластичная. Её теплопроводные свойства также низкие, что, в конечном счёте, влияет на выбор технологических параметров процесса обработки. Недопустимость получения в процессе обработки больших значений температур, является ограничивающим фактором в процессах постотверждения [7].

Обработка пластика характеризуется не всегда контролируемым внутренним разрушением. Составляющие силы резания не всегда типичны, вследствие разницы внутреннего разрушения (вырывания) армирующих волокон [2].

Таким образом, обрабатываемость ПКМ определяется, в основном, физическими и механическими свойствами волокна и матрицы, содержанием (типом) волокна и его направленностью. Например, стекло и углеволокно разрушаются перед режущей поверхностью, при условии малого радиуса r её режущего лезвия, а более жёсткие и прочные арамидные волокна, накапливаются (пакетируются) перед режущей поверхностью. Следовательно, на качество обработанной поверхности значительно влияют тип армирования и его направление [2].

Составляющие силы резания также зависят от характеристики используемых в ПКМ волокон и их направления, так как прочность самой матрицы не оказывает на величину силы резания существенного влияния.

Качество обработанной поверхности является определяющим фактором при оценке обработки ПКМ. Термин «качество» относится как к геометрическим параметрам, так и к

степени повреждения материала, вызванного процессом обработки (царапины, вырывы материала, разлохмачивание и др.). Процесс измерения этих критериев для пластиков более сложный, чем для металлов, из-за неоднородной их структуры. Невозможно использовать профилометр из-за малой твёрдости основы ПКМ. В связи с этим, на сегодняшний день не существуют общепринятые стандарты технологий измерения, характеризующие параметры качества поверхности ПКМ.

Тип стружки при обработке ПКМ во многом зависит от следующих факторов:

- материала и ориентации волокна;
- материала матрицы;
- режимов резания (скорости и глубины резания);
- переднего угла режущего инструмента и радиуса округления его режущей кромки.

Процесс стружкообразования при обработке однонаправленных ПКМ подразделяется на пять различных типов, в зависимости от ориентации волокон и значения наклона переднего угла резания [2], при этом резец имеет острую кромку (радиус округления вершины резца $r = 3 \dots 5$ мкм).

На рис. 1 представлено схематическое изображение процессов, возникающих при резании ПКМ инструментом с большим радиусом округления режущего лезвия.

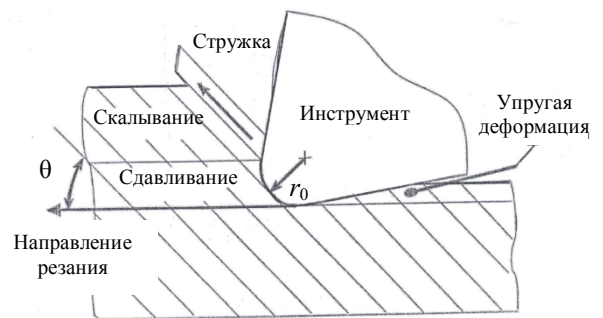


Рис. 1. Резание ПКМ инструментом с большим радиусом округления режущей кромки r_0

При резании инструментом с относительно большим значением r или при очень малой глубине резания, по сравнению со значением r , на траектории перемещения инструмента зона обработки разделяется на две области – сдавливания и скалывания соответственно.

Материал в области сдавливания (упругой деформации) «проталкивается» под инструмент, а затем восстанавливается после прохождения инструмента.

При исследовании микроструктуры обработанной поверхности и стружки часто наблюдается расслоение самой поверхности.

Стружка образуется при резании ПКМ с углом направленности волокон $\theta = 0^\circ$ (180°) (рис. 2).

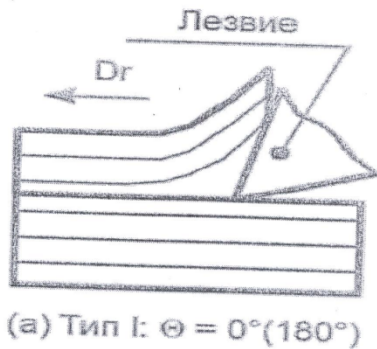
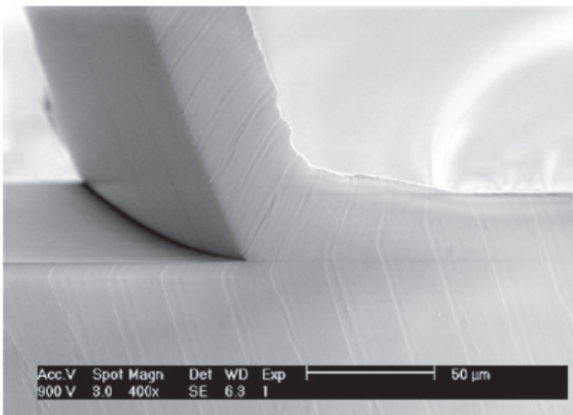
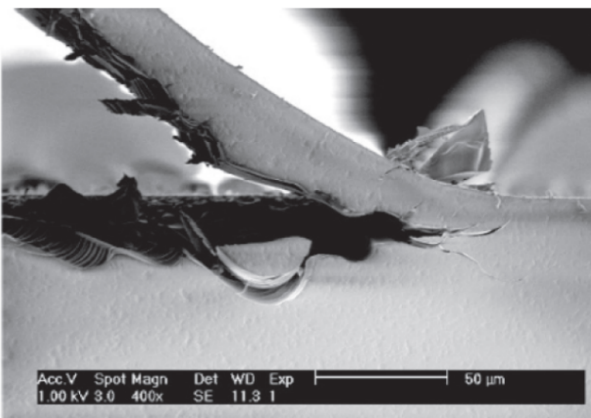


Рис. 2. Угол направленности волокон относительно направления вектора главного движения

На рис. 3 показаны типы стружек, полученные при обработке термопластов (рис. 3, а) и терморектопластов (рис. 3, б).



а)



б)

Рис. 3. Образование стружки матрицы:
а – термопласты; б – терморектопласты

Все эксперименты проводились при точении заготовок из ПКМ на токарном станке с ЧПУ модели Mazak Quickturn (Япония) повышенной точности.

При резании передняя поверхность резца стремится сдвинуть слой материала шириной, равной величине подачи, относительно поверхности резания. Трение на режущем лезвии инструмента взаимодействует с процессом сдвига при образовании стружки и влияет на сдвигаемое направление, деформацию в плоскости сдвига и получаемый тип стружки. При этом угол трения при механической обработке ПКМ в значительной степени зависит от ориентации волокон.

Как показали исследования, первоначальное увеличение угла трения происходит при ориентации волокон от 0° до 15° . Уменьшение угла трения происходит при ориентации волокон в диапазоне $15^\circ < \theta < 90^\circ$. Необходимо отметить, что в отличие от углепластиков, угол трения при механической обработке стеклопластиков мало зависит от ориентации волокон.

Материал режущей части инструмента [3] при обработке ПКМ должен быть весьма износостойким, т.е. выдерживать абразивность волокон, а также другие факторы, которые действуют на его режущие поверхности. Например, при резании образуется вязкотекучий полимер, который является поверхностно-активным веществом, снижающий поверхностную энергию материала инструмента и приводит к его адгезионному износу. Всё это определяет износ инструмента по задней поверхности, увеличение радиуса округления режущего лезвия, что приводит к увеличению составляющих силы резания, к росту динамических явлений при обработке, снижению точности и качества поверхностного слоя изделия.

При обработке ПКМ, армированных органическими волокнами (арамидные волокна типа СВМ или кевлар), которые характеризуются вязким разрушением при резании, необходим режущий инструмент, который предварительно бы создавал при резании растягивающие напряжения в волокне и последующее их быстрое срезание. При этом режущие кромки инструмента должны тянуть волокна от периферии заготовки к её центру. Этим требованиям отвечают режущие инструменты, оснащённые СТМ с радиусом округления режущего лезвия $r = 3 \dots 5$ мкм. Возможно также использование инструмента из твёрдого сплава групп ТК или ТТК с алмазоподобным покрытием режущей части инструмента. Следует отметить, что у последних радиус округления режущего лезвия выше за счёт толщины покрытия и составляет $7 \dots 10$ мкм. Это, как показывают исследования, несколько снижает

эффективность обработки ПКМ.

На рис. 4 показан износ резца при обработке ПКМ с разнонаправленными волокнами из углепластика. Деструкция полимерного связующего материала при резании, в результате которой образуется вязкотекучий в микрообъёмах полимер, являющийся поверхностно-активным веществом (ПАВ), снижает поверхностную энергию материала инструмента, что облегчает отрыв от его поверхности отдельных микро- и макрочастиц. В результате этого возникает механохимический адсорбционный износ инструмента.

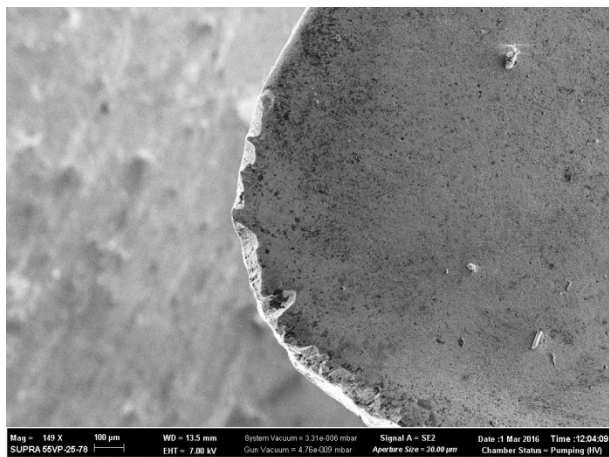


Рис. 4. Износ резца при обработке ПКМ с разнонаправленными волокнами из углепластика

На основании приведённых исследований, были установлены допустимые критерии износа твёрдосплавных сменных пластин группы ТК с покрытием из кубического нитрида бора (CNB): $h_3 = 0,1 \dots 0,2$ мм для черновой обработки и $h_3 = 0,08 \dots 0,1$ мм – для чистовой.

Работа данными резцами со степенью износа не более указанных величин, обеспечивает получение поверхности требуемого качества, без сколов, расслоения, разломачивания с параметрами шероховатости поверхности $Rz = 10 \dots 40$ мкм на черновых операциях и Ra , примерно $0,7 \dots 1,5$ мкм – на чистовых операциях.

Выводы

1. Анизотропия свойств материалов ПКМ, определяющая процесс стружкообразования при обработке вдоль или поперёк армирующих волокон, а также схема армирования оказывает существенное влияние на износ режущего инструмента, качество получаемой поверхности и точность обработки.

2. Теплопроводность углепластиков весьма малая, что обуславливает плохой отвод тепла со стружкой и в обрабатываемое изделие. Это предъявляет особые требования к приме-

няемому режущему инструменту, который должен интенсивно отводить выделяющееся в зоне резания тепло.

3. Склонность к упругому восстановлению обрабатываемой поверхности ПКМ приводит к появлению больших площадок контакта на задних поверхностях инструмента и, как следствие, высокую интенсивность износа инструмента по задней поверхности. При этом снижается точность обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биков, Ю.А. Структура и свойства конструкционных наноматериалов // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2010. – №7. С. 1– 24.
2. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенности технологии механической обработки углепластиков // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 5(59). С. 30– 33.
3. Зубарев, Ю.М. Современные инструментальные материалы. – СПб.: Изд-во «Лань», 2014. – 304 с.
4. Зубарев, Ю.М. Технологическое обеспечение надёжности эксплуатации машин. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 320 с.
5. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г.Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
6. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов. – Сумы: Изд-во ИТД «Университетская книга», 2013. – 97 с.
7. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
8. Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенности механической обработки высокотехнологичных полимерных композиционных материалов на основе углеродного волокна с термопластичной матрицей // Наука и образование: инновации, интеграция и развитие. – 2014. – №1. – С. 174– 179.
9. Пул, Ч., Оуэнс, Ф. Нанотехнологии: пер. с англ. – М.: Техносфера, – 2004. – 328 с.

REFERENCES

1. Bikov, Yu.A. Structure and properties of constructional nano-materials / *Reference Book. Engineering Journal. Appendix*. – 2010. – №7. pp. 1– 24.
2. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities in technology of carbon plastic machining // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 5. pp. 30– 33.
3. Zubarev, Yu.M. *Modern Tool Materials*. – S-Pb.: “Lan” Publishing House, 2014. – pp. 304.
4. Zubarev, Yu.M. *Technological Support in Machine Operation Reliability*. – S-Pb.: “Lan” Publishing House, 2016. – pp. 320.

5. *Parts Surface Engineering* /under the editorship of A.G.Suskov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

6. *Composite Material Machining at Aircraft Assemblage*. – Sumy: PTH “University Book” Publishing House, 2013. – pp. 97.

7. Mikhailin, Yu.A. Constructional polymeric composite materials. – S-Pb.: *Scientific Fundamentals and Technologies*, 2010. – pp. 822.

8. Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities in machining of advanced technology polymeric composite materials based on carbon fiber with thermoplastic matrix // *Science and Education: Innovations, Integration and Development*. – 2014. – №1. – pp. 174– 179.

9. Pool, Ch., Owens, F. *Nano-Technologies*: Transl. from Engl. – M.: Technosphere, – 2004. – pp. 328.

Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарев



Уважаемые коллеги!

03.10. - 07.10.2017 г.

Донской государственный технический университет

ПАО «Роствертол»

проводит

**международный научный симпозиум
«Виброволновые процессы в технологии
обработки деталей высокотехнологичных изделий»**

Направления работы симпозиума:

1. Виброволновые процессы в технологии отделочно-упрочняющей и стабилизирующей обработки деталей.
2. Вибрационная механохимия в процессах обработки и покрытий.
3. Научно-технические технологии обработки и сборки высокотехнологичных изделий.
4. Технологическое обеспечение виброволновых процессов, научно-технических методов обработки и сборки изделий (оборудование, инструментальное обеспечение, методы и средства контроля и испытаний).
5. Технологические, организационно-экономические и экологические аспекты утилизации изделий.
6. Подготовка и повышение квалификации специалистов для научно-технических технологий в машиностроении.

Организационный комитет:

Бабичев А.П. (председатель) – директор НИИ «Вибротехнология» ДГТУ, д.т.н., проф., заслуженный деятель науки и техники РФ, председатель международного комитета «Вибротехнология»; г. Ростов-на-Дону;

Тамаркин М.А. (сопредседатель) – зав. каф. «Технология машиностроения» ДГТУ, д.т.н., проф.;

Лебедев В.А. (зам. председателя) – к.т.н., проф. каф. «Технология машиностроения» ДГТУ;

Давыдова И.В. (учёный секретарь) – к.т.н., доц. каф. «Технология машиностроения» ДГТУ

Адрес организационного комитета:

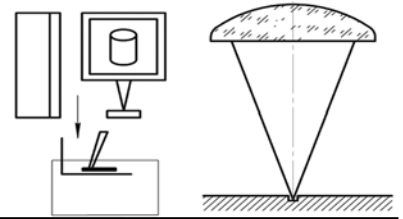
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ДГТУ,

Кафедра «Технология машиностроения»

НИИ «Вибротехнология», к.2-107

Тел. (863)2738-513, 2738-360,

E-mail: vibrotech@mail.ru; va.lebidev@yandex.ru



УДК 621.37

DOI: 10.12737/article_592d1611721c60.85207792

М.А. Якимова, аспирант,
Д.М. Мельников, к.т.н.,
А.Б. Садков, студент,
А.Г. Григорьянц, д.т.н.,

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1)
E-mail: mt12@bmstu.ru; Marya.korotaeva@yandex.ru

Фотоакустическая гомогенизация вещества для оптических измерений*

Представлены теоретическое и экспериментальное исследования применения фотоакустического эффекта для гомогенизации дисперсных веществ с целью повышения точности спектральных измерений.

Ключевые слова: фотоакустический эффект; дисперсность частиц; гомогенизация.

M.A. Yakimova, Post graduate student,
D.M. Melnikov, Can. Eng.,
A.B. Sadkov, Student,
A.G. Grigoriyants, D. Eng.

(Bauman STU of Moscow, Building 1, 5, 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005)

Photo-acoustic substance homogenization for optical measurements

Theoretical and experimental investigations of photo-acoustic effect use for the homogenization of dispersion particles with the purpose of spectral measurement accuracy increase are shown.

Keywords: photo-acoustic effect; particle dispersiveness, homogenization.

Одним из актуальных направлений развития измерительной техники является разработка приборов и методов исследования качественного и количественного состава веществ, имеющих неоднородную структуру, например, содержащих большое количество компонентов, рассеивающие частицы.

Широко распространенные в настоящее время спектральные методы анализа предназначены, в первую очередь, для анализа однородных веществ, и при проведении измерений параметров полидисперсных многокомпонентных веществ встречаются следующие

сложности [1], например, перекрытие сигналов от различных компонентов, размытие сигнала в следствии дисперсности частиц по размерам и др.

Чтобы снизить погрешность измерений и повысить их разрешающую способность применяют различные способы пробоподготовки [1]: разделение компонентов химическими или физическими способами, гомогенизация пробы и др.

Из приведенных выше факторов, влияющих на погрешность спектральных измерений, наибольшую сложность представляет дисперсия рассеивающих частиц по размерам. Рассеяние излучения на частицах приводит к изменению пространственного распределения

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

излучения после прохождения слоя вещества.

В случае монодисперсных частиц этот процесс может быть учтен при обработке результатов экспериментов. Если же размеры частиц обладают существенным разбросом (а при этом часто не известен вид распределения и его параметры), учет влияния рассеяния становится крайне затруднительным [2]. И хотя разработан ряд методов обработки результатов измерений, учитывающих это влияние, на практике для снижения погрешности, как правило, используется предварительная обработка пробы, а именно – гомогенизации пробы. Этот процесс заключается в измельчении частиц под действием различных физических процессов до размеров, обладающих наибольшей стабильностью.

В частности, гомогенизация молока предусмотрена при проведении фотометрического анализа содержания жира в молоке. Молоко нагревается до температуры 40°, гомогенизируется, после чего охлаждается до температуры 20°. Эта процедура требует дополнительного оборудования, занимает сравнительно много времени (15...20 мин), при этом, не обеспечивая высокой степени равномерности распределения частиц по размерам [3].

В приборостроении, как правило, используются ультразвуковые гомогенизаторы. В этом случае расплавленный жир дробится на частицы размерами 0,3...1,0 мкм под действием акустических волн. Однако ультразвуковые гомогенизаторы обладают остаточной дисперсией около 1,8...2,0 мкм. Кроме того, распределение по размерам по объему вещества не является однородным и зависит от расстояния до щупа. Это приводит к существенной остаточной погрешности.

Альтернативой использованию ультразвуковых гомогенизаторов, источником акустических волн в которых являются механические колебания, может быть фотоакустическая гомогенизация пробы. Фотоакустический эффект наступает при поглощении лазерного излучения веществом и генерации акустической волны вследствие быстрого локального нагрева и расширения вещества [4]. Возникающая при этом акустическая волна, при правильном выборе параметров лазерного излучения может вызвать дробление частиц жира, т.е. гомогенизацию молока.

Преимущества лазерного возбуждения ультразвука заключаются в том, что гомогенизацию жира можно проводить непосредственно в области проведения измерений; при этом может быть использован тот же лазер, что для

проведения последующих измерений, но с большей мощностью излучения. Естественно, в этом случае необходима возможность изменения мощности излучения лазера.

Стоимость экспериментальной установки возрастет, но сократится время проведения экспериментов и снизится количество дополнительного оборудования. Гомогенизирована будет именно та область пробы, для которой проводят измерения, что также будет способствовать снижению погрешности измерений.

Теоретические основы метода. Частицы жира, находящиеся в зоне распространения акустической волны, испытывают деформации. Как правило, при расчетах принимают, что механическая прочность биологического объекта позволяет выдерживать деформацию, не превышающую 20 % от ее размера. Деформация частицы, вызванная акустической волной, может быть в первом приближении определена из соотношения:

$$\Delta x = \frac{F}{kS}, \quad (1)$$

где Δx – деформация частицы; F – давление, действующее на частицу; S – площадь сечения частицы; k – вязкость частицы.

Расчет оказываемого давления требует определения ряда параметров акустической волны. Генерация акустической волны происходит в результате нагрева малой области, облучаемой лазерным излучением, расширения этой области и возникновения перепадов плотности [5].

Расчет силы, действующий в этом случае на частицу, находящуюся в области распространения акустической волны, может быть произведен исходя из следующих соображений [1].

Амплитуда акустической волны определяется по формуле

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \Delta \varphi = \frac{\beta \alpha I_0}{\rho c_p} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) f(r), \quad (2)$$

где φ – скалярный потенциал поля скоростей; Δ – оператор Лапласа; c_0 – скорость света в рассматриваемой жидкости; β – объемный коэффициент температурного расширения; c_p – коэффициент теплопроводности.

Потенциал силы рассчитывается по формуле

$$U = 2\pi r_s^3 \rho \left(\frac{\overline{p_i}^{-2}}{3\rho^2 c_0^2} f_1 - \frac{\overline{v_i}^{-2}}{2} f_2 \right) \quad (3)$$

где $\overline{p_i}^{-2}$ и $\overline{v_i}^{-2}$ – усредненные по времени квадраты давления и скорости акустической волны в среде, а постоянные f_1 и f_2 определяются из выражений:

$$f_1 = 1 - \frac{c_0^2 \rho}{c_s^2 \rho_s}; \quad (4)$$

$$f_2 = 2 \frac{\rho_s - \rho}{2\rho_s + \rho}. \quad (5)$$

Усредненные по времени потенциальная и кинетическая энергии рассчитываются по формулам:

$$\overline{V_i} = \frac{1}{2} \rho \overline{v_i}^{-2}; \quad (6)$$

$$\overline{T_i} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho c_0^2} \overline{p_i}^{-2}. \quad (7)$$

И наконец, сила, действующая на частицу, будет определяться зависимостью

$$U = 2\pi r_s^3 \left(\frac{2}{3} f_1 F_1 - f_2 F_2 \right), \quad (8)$$

где

$$F_1 = \nabla \overline{T_i}; \quad F_2 = \nabla \overline{V_i}.$$

На рис. 1 приведен график, демонстрирующий зависимость силы, действующей на частицу, от расстояния до центра лазерного луча. Из графика видно, что на определенном расстоянии от центра луча происходит изменение знака силы. В случае, когда частица жира попадает в данную область, будет наблюдаться эффективная гомогенизация частиц жира.

Однако для этого необходимо, чтобы интенсивность излучения была достаточной для достижения необходимой деформации частиц жира. Расчеты показывают, что для достижения деформации, вызывающей дробление частиц жира, необходима средняя мощность лазерного излучения порядка 100 мВт, что вполне достижимо в современных лазерных установках.

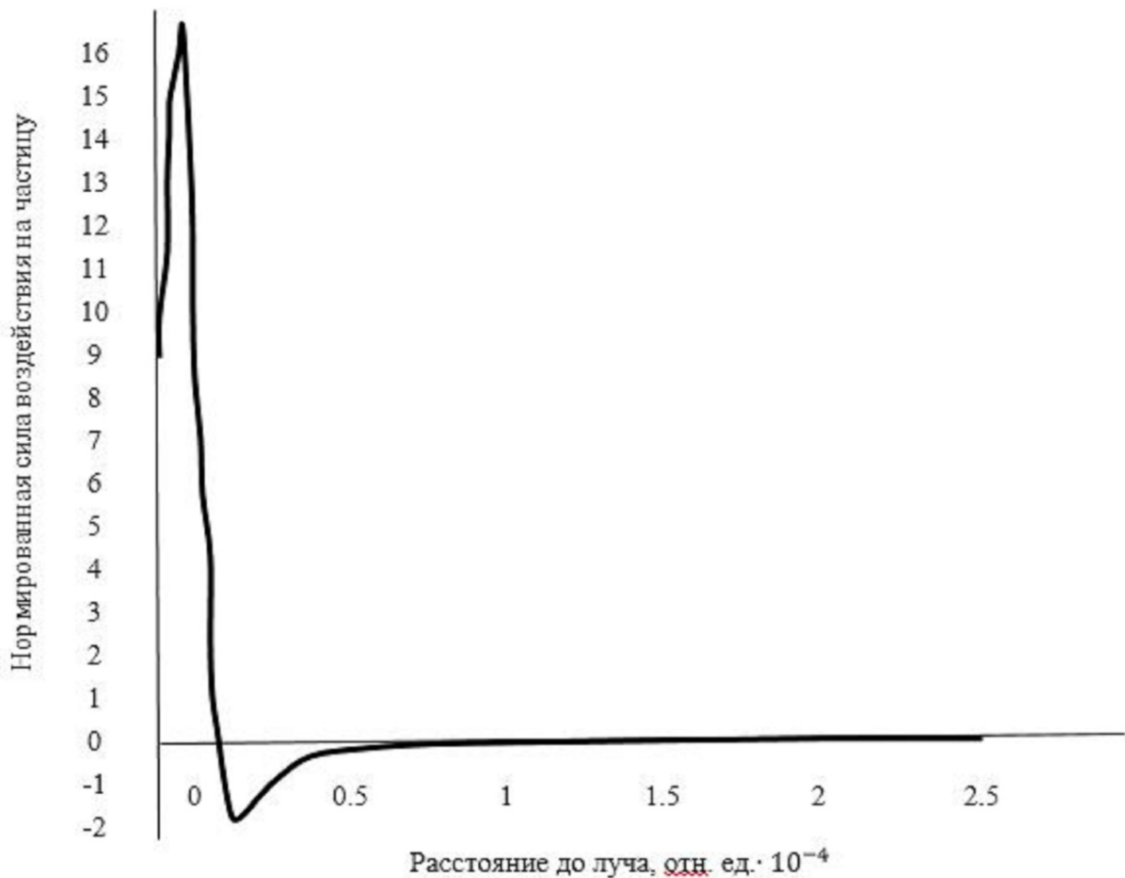


Рис. 1. Зависимость силы, действующей на частицу, от расстояния до центра лазерного луча

Экспериментальная часть. Экспериментальное исследование было проведено на установке, приведенной на рис. 2. В качестве источника излучения был использован лазер на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом. Излучение при помощи коллими-

рующей системы вводилось в оптическую систему фотометра. Мощность излучения регулировалась при помощи набора поглощающих светофильтров. Исследуемая проба молока помещалась в кювету, обеспечивающую толщину слоя образца порядка 30 мкм.

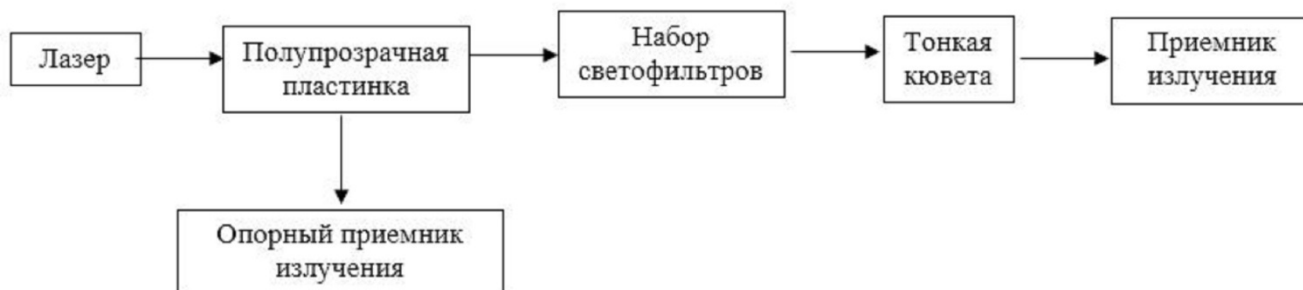


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В качестве исследуемого образца использовалось негомогенизированное молоко, жирность которого была определена стандартизованным методом (методом Розе-Готлиба), и составляла 2,0; 3,5; 4,9 %. При проведении экспериментов проба облучалась более мощной последовательностью импульсов лазерного излучения, которые должны были вызвать гомогенизацию частиц жира. После этого интенсивность излучения уменьшалась с помо-

щью светофильтров, и проба облучалась серией импульсов, которая использовалась для измерения концентрации жира в пробе.

Эксперименты проводились для различной интенсивности гомогенизирующих импульсов. На рис. 3 приведен график зависимости погрешности измерений, проведенных после воздействия гомогенизирующих импульсов различной интенсивности.

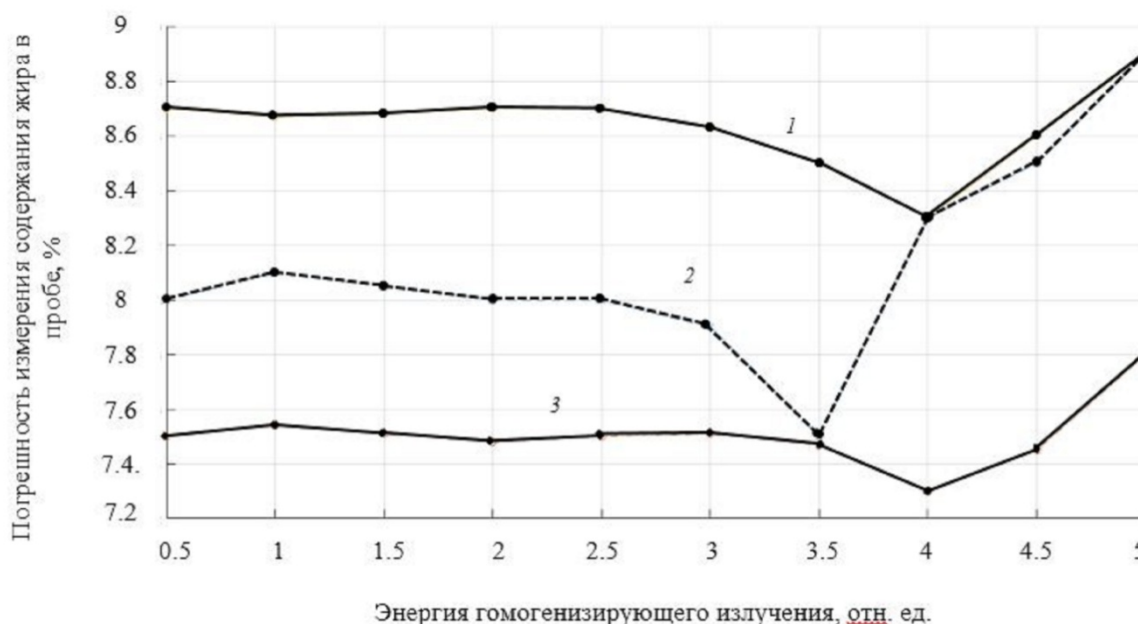


Рис. 3. Зависимость погрешности фотометрических измерений от энергии гомогенизирующего излучения: 1 – жирность 4,9 %; 2 – жирность 3,5 %; 3 – жирность 2 %

Видно, что в определенном диапазоне интенсивности гомогенизирующего излучения наблюдается изменение погрешности измерений. Причем имеет место оптимальная энергия излучения, при превышении которой по-

грешность измерений начинает быстро возрастать, что может быть связано с образованием воздушного пузырька в результате фотоакустического эффекта при высокой интенсивности поглощенного излучения.

Выводы

Экспериментальные результаты показывают, что применение фотоакустической гомогенизации позволяет снизить погрешность фотометрических измерений, причем процесс пробоподготовки и измерений производится на одной и той же установке, что является оптимальным для практического применения предлагаемой методики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алехнович, В.И., Григорьянц, А.Г., Якимова, М.А., Мельников, Д.М., Баранов, Д.А. Фотоакустическая гомогенизация молока с целью повышения точности спектрального анализа // *Контенант*. – 2015. – Вып. 1. – С. 101–105.
2. Розенберг, Г.В. Физические основы спектроскопии рассеивающих веществ // *Успехи физических наук*. – 1967. Апрель. Т. 91. – Вып. 4.
3. Якимова, М.А., Алехнович, В.И., Григорьянц, А.Г. Рефрактометр НПВО для исследования рассеивающих веществ // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2017. №5(71). – С. 44–48.
4. Acoustic signals generated by laser- irradiated metal na-

noparticles Sergey Egerev, Sergey Ermilov, Oleg Ovchinnikov; *APPLIED OPTICS* / Vol. 48, No. 7 March 2009

5. Zharov V.P., Malinsky T.V., Kurten R.C., Phys J. D: *Appl. Phys.*, 38, 2662-2674 (2005).

REFERENCES

1. Alekhovich, V.I., Grigoriyants, A.G., Yakimova, M.A., Melnikov, D.M., Baranov, D.A. *Photo-acoustic Milk Homogenization for Spectral Analysis Accuracy Increase* // *Contentant*. 2015. Edition 1. pp. 101–105.
2. Rosenberg, G.V. *Physikal fundamentals in scattering substance spectroscopy* // *Successes of Physical Sciences*. 1967. April. Vol. 91. Edition 4.
3. Yakimova, M.A., Alekhovich, V.I., Grigoriyants, A.G. NPVO Refractometer for scattering substance investigation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2017. №5(71). – С. 44–48.
4. Acoustic signals generated by laser- irradiated metal nanoparticles Sergey Egerev, Sergey Ermilov, Oleg Ovchinnikov; *APPLIED OPTICS* / Vol. 48, No. 7 March 2009
5. Zharov V.P., Malinsky T.V., Kurten R.C., Phys J. D: *Appl. Phys.*, 38, 2662-2674 (2005).

Рецензент д.т.н. В.Н. Ластовица

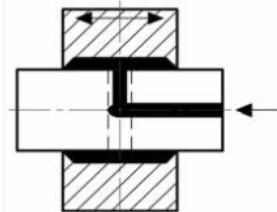
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

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

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

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

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



УДК 62-522.2

DOI: 10.12737/article_592d163e95d2a0.50506220

Д.И. Колобовникова, магистр,
Е.П. Майданюк, бакалавр,
Э.А. Петровский, д.т.н.
(Сибирский федеральный университет, Красноярск, пр-т Свободный, 82, стр. 6)
E-mail: dariakolobovnikova@gmail.com; maidanyuk-evgeni@mail.ru;
petrovsky_quality@mail.ru

Автоматизация процесса центровки двигателя насосной установки

Рассмотрены существующие способы и устройства для осуществления процесса центровки валов роторных машин. Описан принцип работы трехконтурной гидравлической системы управления устройством для центровки. Представлена принципиальная схема работы гидростатических опор, гидроцилиндров подъема и поворотного гидродвигателя. Описана система автоматического управления по сигналу рассогласования.

Ключевые слова: бесконтактные опоры; роторные системы; теоретические методы; экспериментальные методы; технологическое устройство для центровки; гидростатическая опора; гидроцилиндры подъема; поворотный гидродвигатель.

D.I. Kolobovnikova, Master,
E.P. Maydanyuk, Bachelor,
E.A. Petrovsky, D. Eng.
(Siberia Federal University, Building 6, 82, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk)

Automation of engine alignment in pumping facility

The existing ways and devices for the fulfillment of shaft alignment processes in rotor machines are considered. A principle of the operation of three-flow hydraulic system control of the device for alignment is described. A circuit diagram of the operation of hydro-static bearings, hydraulic cylinders of lifting and a rotating hydraulic actuator is shown. A system for automatic control on a signal of mismatch is described.

Keywords: contactless bearings; rotor systems; theoretical methods; experimental methods; technological device for alignment; hydro-static bearing; hydraulic cylinders of lifting; rotating hydraulic actuator.

В настоящее время существует большое количество мощных насосов, которые не предусматривают в своей конструкции электропривода и требуют подключения не входящего в конструкцию электродвигателя. Но соответственно монтаж таких крупногабаритных агрегатов всегда создает ряд сложностей, связанных с точной центровкой валов агрегатов насосной установки.

При не точной стыковке электродвигателя и насосного агрегата возникают смещения, и валы стремятся найти общую ось вращения. Эта ось вращения может быть смещена в осе-

вом, радиальном и угловом направлении, данное нарушение конструкции приводит к неправильной работе и последующему выходу из строя всей установки.

Данная задача решена с помощью ряда методов [1]: методы при использовании индикаторов часового типа, метод обратных индикаторов и метод при использовании штангенциркуля и щупа. Но эти методы не позволяют достаточно точно изменять положение самого двигателя, при стационарном положении насосного агрегата. Самым современным способом контроля несоосности является использо-

вание лазерного оборудования, оно позволяет в режиме реального времени зафиксировать неточность при монтаже валов [2]. Лазер чувствителен к условиям окружающей среды, и данный метод лишь позволяет зафиксировать несоосность, но не дает в полной мере точно изменять само положение конструкции.

Трудности возникают при непосредственном изменении положения электродвигателя относительно насоса. Специалисту трудно и порой невозможно с помощью лебедок и домкрата достаточно точно менять положение агрегата в процессе сборки, монтажа или ремонта.

Представленные методы решают проблему измерения смещения оси, но не решают проблему точности самого процесса сборки, а именно изменение положения самого электродвигателя относительно насосного агрегата.

Для решения проблемы повышения надежности насосной установки в процессе эксплуатации путем повышения точности сборки предложено создание центровочного устрой-

ства. Данная конструкция, используя показатели датчиков, позволит перемещать конструкцию в пространстве компенсируя несоосность при сборке. Технологическое устройство центровки двигателей насосных установок позволяет повысить долговечность узлов и агрегатов машины, и соответственно, облегчает процесс сборки, монтажа и ремонта.

В процессе работы соосность поддерживается за счет адаптивных гидростатических опор, давление в которых регулируется автоматически мембранным регулятором.

На рис. 1 изображена принципиальная гидравлическая схема работы гидравлических цилиндров. Гидроцилиндры (1, 2, 3, 4) управляются попарно с помощью переключения золотников регуляторов давления с электромагнитным управлением (5, 6, 7, 8), переключение осуществляется по сигналу рассогласования от датчиков. Поворот по оси OY осуществляется включением цилиндров парами 1 – 3 и 2 – 4, при повороте по оси OX включаются гидроцилиндры 1 – 2 и 3 – 4.

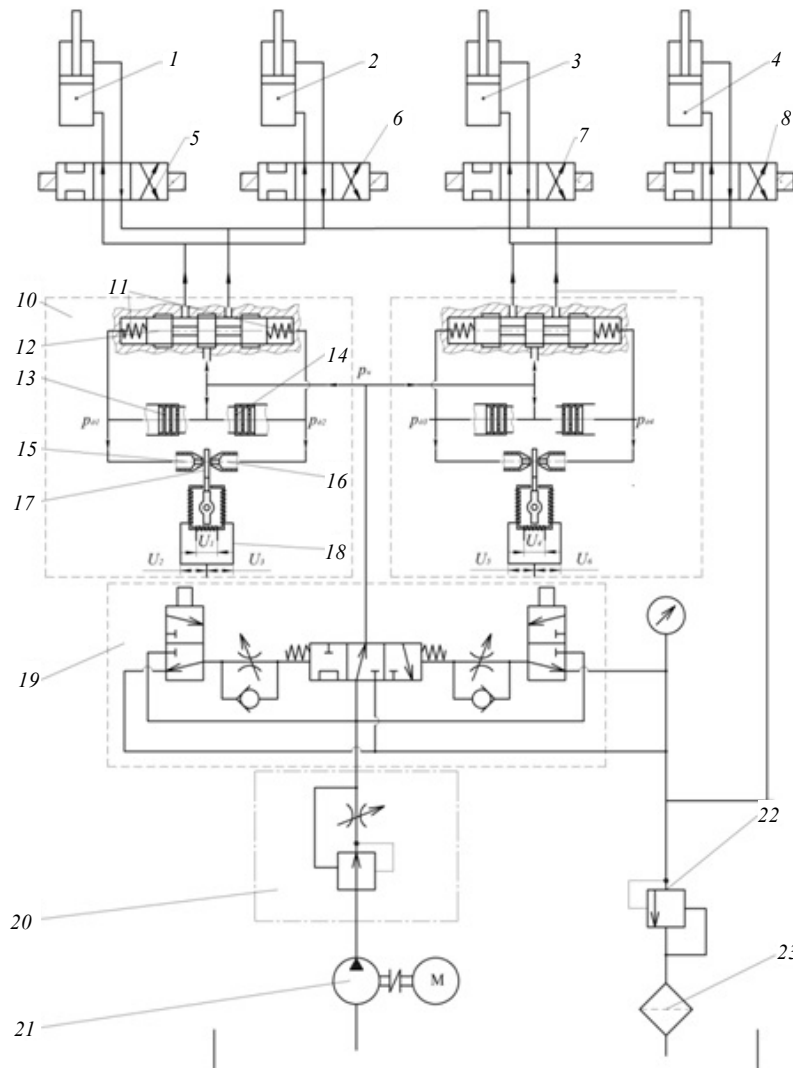


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема системы настройки соосности при сборке

Управление золотниковыми регуляторами реализуется гидроусилителями (10) с каскадным усилением сигнала (18). Первая ступень усиления содержит в себе два вида дросселя: типа сопло-заслонка (16, 15) и не регулируемые щелевые дроссели (13, 14). Сопло (17) отклоняется от воздействия преобразователя сигнала (18). Поворотный двигатель преобразователя конвертирует в аналоговый сигнал в виде разности напряжений U_1 и U_2 , который впоследствии и отклоняет заслонку. Вторая ступень усилителя реализована в виде золотникового регулятора давления (12).

На рис. 2 изображена принципиальная гидравлическая схема работы гидростатических опор (1, 2, 3, 4) регулируется при помощи регуляторов с жесткой мембранной (5, 8, 11, 14) [3, 4]. Данный регулятор представляет собой закрепленную мембрану (6, 9, 12, 15), изменяющую проходное сечение седла регулятора в зависимости от перепада давления. Мембрана в зависимости от перепада давления в системе, которое возникает под действием возмущающей силы P на опоры, изменяет проходное сечение на входе к опоре.

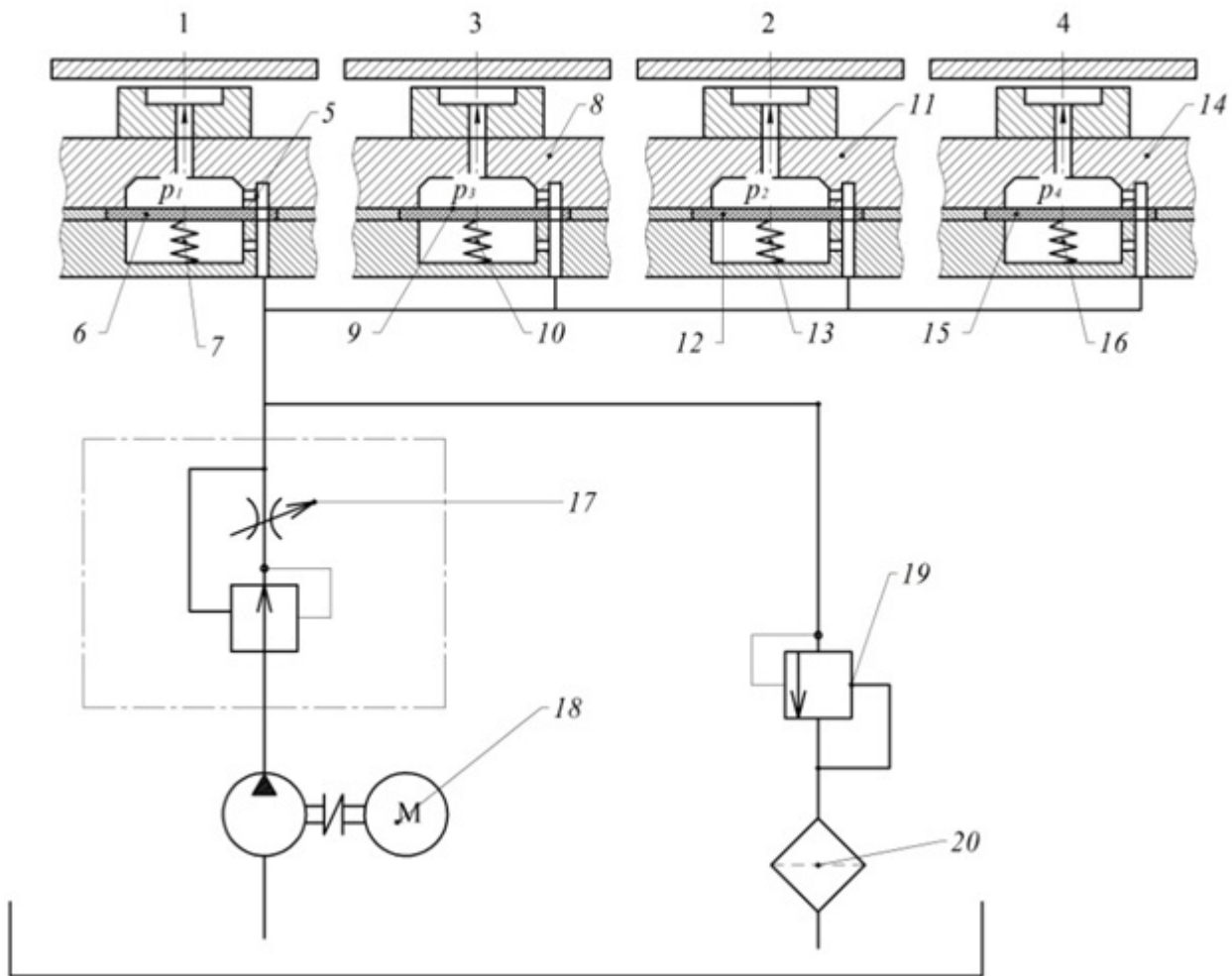


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема адаптивной системы поддержания соосности в процессе работы

На рис. 3 изображена принципиальная схема работы поворотного гидродвигателя. Поворотный гидродвигатель состоит из корпуса (1), и поворотного ротора, представляющего собой втулку (2), несущую лопасть (3). Кольцевая полость между внутренней поверхностью цилиндра и ротором разделена уплотнительной перемычкой (4) с уплотнением (5). Поворот втулки (2) реализуется при перепаде давления в камерах гидро-

двигателя.

На рис. 4 изображен общий вид центрирующего устройства, оно представляет собой платформу, которая может компенсировать смещение установленного на нее роторного агрегата по четырем координатам. Регулировка в автоматическом режиме осуществляется по одной линейной координате вдоль оси OZ и по трем углам соответственно по осям OZ , OX и OY .

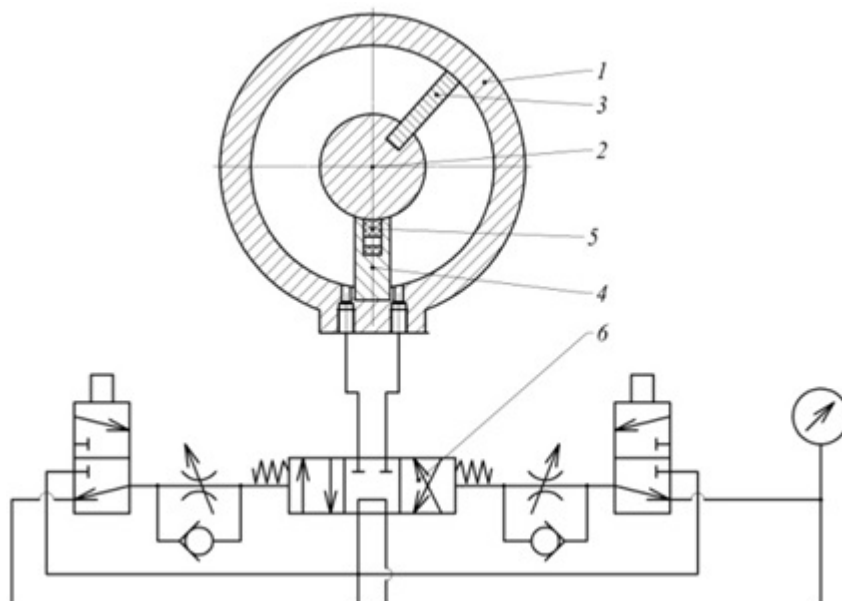


Рис. 3. Схема работы поворотного гидродвигателя

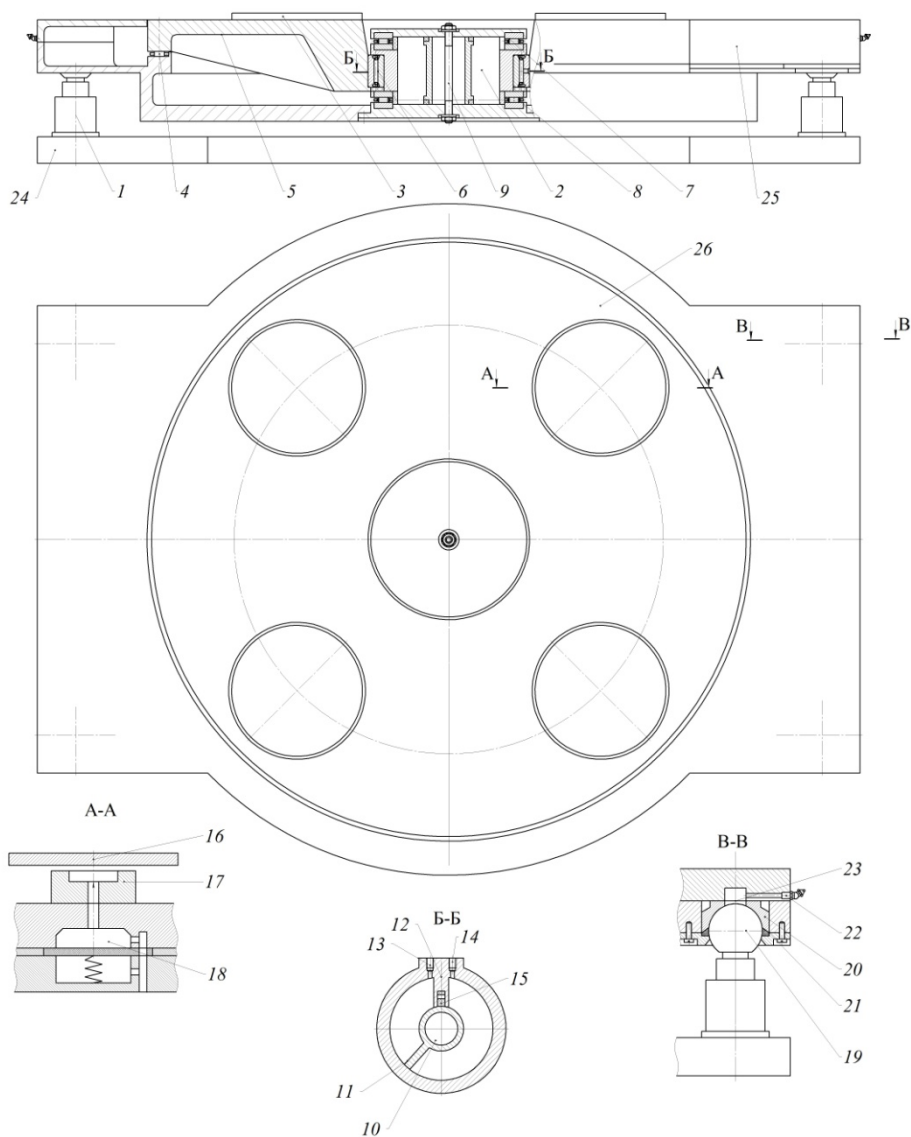


Рис. 4. Общий вид центрирующей плиты

Регулировка по оси OZ производится с помощью четырех шарнирных гидроцилиндров (1), при помощи шарнирных штоков возможна компенсация по осям OX и OY .

Шарнирный шток (19) закрепляется с помощью подпятника (20) в корпусе плиты (25) и уплотняется сальником (21), процесс смазки осуществляется по желобу масленки (22) через полость (23).

Поворот по оси OZ реализуется поворотным гидродвигателем (9), который осуществляет поворот плиты (5) по оси OZ . В процессе эксплуатации роторных агрегатов для поддержания соосности и гашения вибраций в корпусе плиты (5) находятся четыре демпфирующих гидростатических опоры (3). Передача поворота от гидродвигателя (9) осуществляется с помощью подшипников (6), (8) и (7).

Центрирующая платформа с адаптивным гидроприводом позволяет автоматизировать процесс монтажа как электродвигателей с насосом, так и монтаж других роторных и приводных машин. Система шарнирных гидроцилиндров с поворотным гидродвигателем позволяет компенсировать неточность при первичном монтаже, а система гидростатических опор позволяет поддерживать соосность и погасить вибрации, выступая уже как демпфер в процессе эксплуатации приводных и роторных машин.

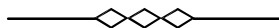
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киселева, Е.Н. Обеспечение соосности поверхностей валов // *Educatio*. – 2015. – №7(14). – С. 34 – 36.
2. Жильцов, А.П., Бочаров, А.В., Недомолкин, Д.В. Изучение основ центровки валов роторных машин с помощью специального учебного стенда // *Успехи современного естествознания*. – 2014. – №12. – С. 123 – 125.
3. Аверьянов, Г.С. Гидростатическая опора повышенной жесткости с мембранным регулятором расхода жидкости // *Омский научный вестник*. – 2007. – № 3 (60). – С. 53 – 54.
4. Гартман, Т.Н. Компьютерное моделирование простых гидравлических систем. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002. – 240 с.

REFERENCES

1. Kiselyova, E.N. Assurance of shaft surfaces alignment // *Educatio*. – 2015. – №7(14). – pp. 34 – 36.
2. Zhiltsov, A.P., Bocharov, A.V., Nedomolkin, D.V. Analysis of fundamentals in rotor machine shaft alignment using special training bench // *Successes in Modern Natural Science*. – 2014. – №12. – pp. 123 – 125.
3. Averianov, G.S. Hydrostatic bearing with increased rigidity and membrane regulator of liquid consumption // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2007. – № 3 (60). – pp. 53 – 54.
4. Hartman, T.N. CAD of Simple Hydraulic Systems. – M.: Mendeleev RCTU, 2002. – pp. 240.

Рецензент д.т.н. В.В. Непомилуев



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 12.05.2017. Выход в свет 30.06.2017.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

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