

ГЛАВНЫЙ МЕХАНИК

Всероссийский ежемесячный научно-практический журнал

WWW.PANOR.PF

Издательский Дом

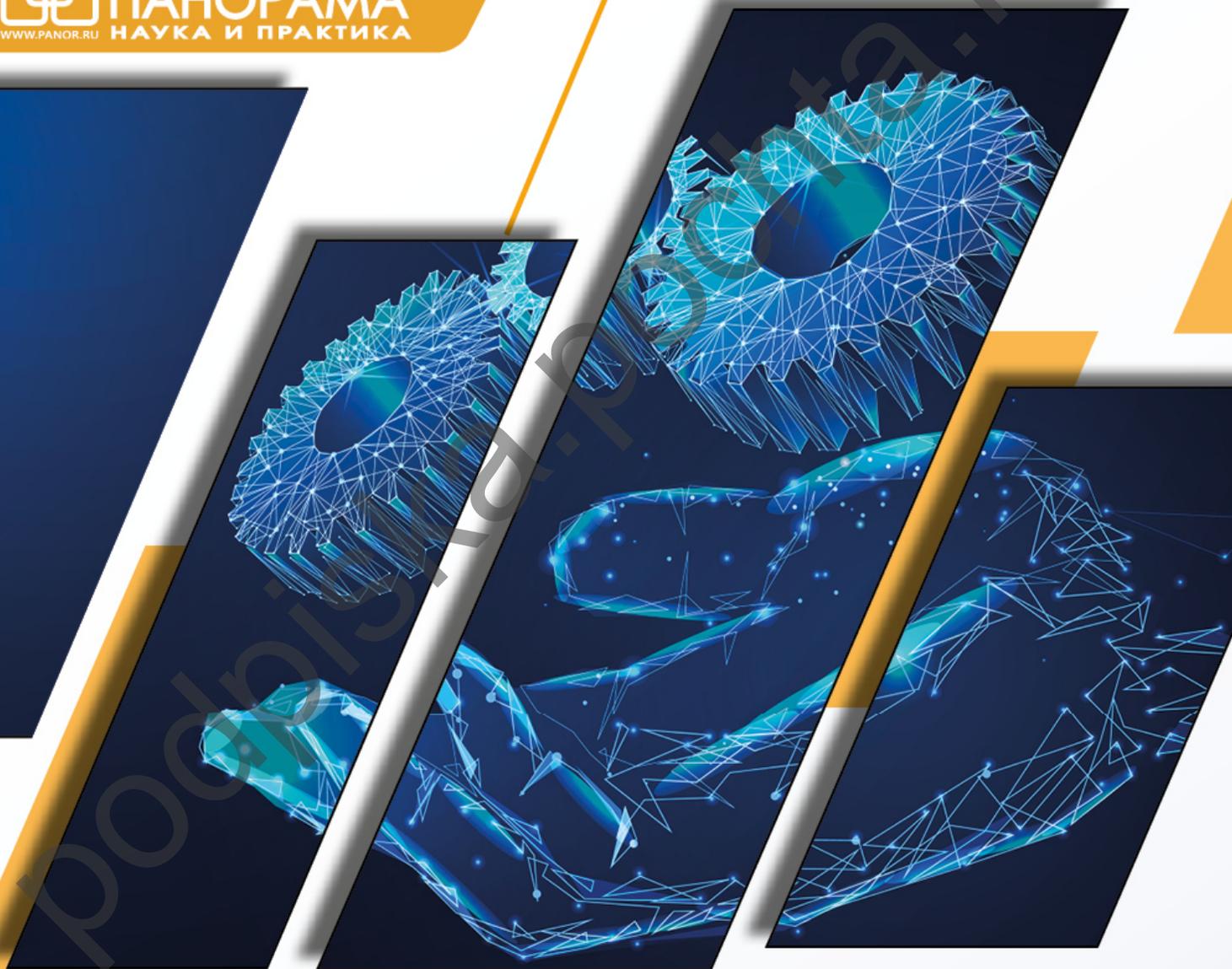


ПАНОРАМА

WWW.PANOR.RU

НАУКА И ПРАКТИКА

ISSN 2074-7470



Том XX

4
2023

ТЕМА НОМЕРА

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФУЗИОННОЙ
СВАРКИ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

ISSN 2074-7470

ЖУРНАЛ
«Главный механик»
том 20, № 4 (236) апрель / 2023

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

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-82400 от 08.12.2021

Учредитель

Общество с ограниченной
ответственностью
Издательский Дом «ПАНОРАМА»
119602, г. Москва, ул. Академика Анохина,
д. 34, корп. 2

Издатель

© Издательский Дом «Панорама»
127015, г. Москва,
Бумажный проезд, д. 14, стр. 2,
подъезд 3, а/я 27
www.panor.ru

Генеральный директор ИД
«Панорама» —

Председатель Некоммерческого
фонда содействия развитию
национальной культуры и искусства
К.А. Москаленко

Издательство «Промиздат»

127015, г. Москва, Бумажный проезд,
д. 14, стр. 2, под. 3, а/я 27
Тел.: 8 (495) 274-22-22 (многокан).
www.promizdat.com

**Журнал распространяется через
подписку. Оформить подписку
с любого месяца можно:**

- На нашем сайте panor.ru;
- Через нашу редакцию
по тел. 8 (495) 274-2222
(многоканальный) или по заявке
в произвольной форме на адрес:
podpiska@panor.ru;
- По «Каталогу периодических
изданий. Газеты и журналы»
агентства «Урал-пресс»
(индекс на полугодие — **82716**).
- По официальному каталогу
Почты России «Подписные
издания» (индекс — **П7202**);

Отдел подписки:

тел./факс: 8 (495) 274-22-22
(многоканальный),
e-mail: podpiska@panor.ru

Отдел рекламы:

тел.: 8 (495) 274-22-22
(многоканальный),
e-mail: reklama@panor.ru

Внимание! Подписка на 1-е полугодие 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕМА НОМЕРА: ПРИМЕНЕНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ
СВАРКИ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

**Особенности формирования соединения
тонкостенных конструкций из титановых сплавов
диффузионной сваркой200**

**Гадалов, В. Н., Губанов, О. М., Петренко, В. Р.,
Филонович, А. В.**

Описаны особенности формирования соединения тонкостенных конструкций из листовых титановых сплавов, полученных диффузионной сваркой. Достигнутый уровень технологии диффузионной сварки позволяет получать тонкостенные конструкции из титановых сплавов с необходимым комплексом механических свойств, и дальнейшие успехи в развитии и применении диффузионной сварки будут связаны с разработкой комплекса оборудования для контроля качества. Полученные результаты могут быть получены и использованы при создании новых и усовершенствовании уже имеющихся материалов и ресурсосберегающих технологий, в частности для получения качественных тонколистовых соединений из разнородных металлов и сплавов с применением диффузионной сварки в вакууме.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Энергоемкость механической обработки
в зависимости от режимов резания на примере
фрезерования концевой фрезой.....207**

Сундетов, М. А., Мухамбетов, С. Б., Киселев, В. Л.

В работе изучено влияние режимов и параметров фрезерования концевой фрезой на энергоемкость процесса резания. Представлен образец методики расчета энергоемкости, режимов и параметров фрезерования. Результаты работы позволят на этапе проведения технологической подготовки производства подбирать наиболее энергоемкие режимы резания для фрезерования концевой фрезой.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Разработка конструкции шагающего робота 213

Юренкова, Л. Р., Билаш, Н. В., Топорец, Д. А., Валова, О. А.

В статье приведена действующая экспериментальная модель шагающего робота с шестью ногами, каждая из которых имеет четыре степени свободы для передвижения по поверхностям со сложным рельефом. При разработке

Журнал издается под эгидой
Международной Академии
технических наук и промышленного
производства

Подписано в печать 22.03.2023 г.

Отпечатано в типографии
ООО «Инфо-Пресс», 117437, г. Москва,
ул. Профсоюзная, д. 104
Установочный тираж 5000 экз.

Приглашаем авторов к сотрудничеству.
Статьи публикуются на безгонорарной
основе.

Цена свободная

Редакционный совет:

Михайлов А.Н., д-р техн. наук, профессор,
Донецкий национальный технический
университет, г. Донецк

Ганина Г.Э., канд. техн. наук, доцент,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Егоров В.Н., д-р техн. наук, профессор,
зам. генерального директора по науке,
ОАО «НИАТ», г. Москва

Игнатов А.В., канд. техн. наук, доцент,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Пшеничный М.В., канд. техн. наук,
ген. директор, ОАО «ЦНИТИ», г. Москва

Островский Ю.А., канд. техн. наук, доцент,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Югов В.И., канд. техн. наук,
гл. конструктор — тех. директор,
ООО «ЦЛТ», г. Владимир

Сидоров В.А., д-р техн. наук, профессор,
Донецкий национальный технический
университет, г. Донецк

Покинтелица Н.И., д-р техн. наук,
профессор,
г. Севастополь

Ерньоко С.П., д-р техн. наук, профессор,
Донецкий национальный технический
университет, г. Донецк

Лагунова Ю.А., д-р техн. наук, профессор,
Уральский государственный горный
университет, г. Екатеринбург

Федорова Л.В., д-р техн. наук, профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Морозов А.В., д-р техн. наук, профессор,
Ульяновский государственный аграрный
университет им. П.А. Столыпина,
г. Ульяновск

Федоров С.К., д-р техн. наук, профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Иванова Ю.С., канд. техн. наук, доцент
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Макаров В.М., д-р техн. наук, профессор,
МГТУ СТАНКИН, г. Москва

Гадалов В.Н., д-р техн. наук, профессор,
Юго-Западный государственный
университет, г. Курск

Лукина С.В., д-р техн. наук, профессор,
МГТУ СТАНКИН, г. Москва

Никифоров В.В., учредитель
Международный клуб G.O.P.
(Gas. Oil. Package), г. Москва

Спиридонов А.А., учредитель
Международный клуб G.O.P.
(Gas. Oil. Package), г. Москва

концепции шагающего робота, способного устойчиво передвигаться по различным неровным поверхностям, инженеры обратили внимание на муравьев, которые благодаря своему природному строению обладают такой способностью. Изобретательные люди многое заимствуют из природы, которая до сих пор хранит нераскрытые тайны.

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Компьютерное зрение при исследовании хаотических процессов в науке и технике 219

Юренкова, Л. Р., Минеев, А. Б., Олейников, А. А., Рожков, Д. А.

В статье приведены результаты применения компьютерного зрения при исследовании процессов, связанных с броуновским движением, то есть хаотическим движением элементов микросистем. Если частицы видимы электронно-оптическими приборами и различимы на общем фоне, то благодаря видеонаблюдению и последующей кадровой обработке видео методами компьютерного зрения возможно определение кинематических параметров наблюдаемых частиц в разные моменты времени.

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Техногеральдика Донецкой области 223

Мартыненко, В. А., Сидоров, В. А.

«Третья геральдическая реформа» в Донбассе была чисто коммерческой. Повальное увлечение коллекционированием значков с гербами вызвало развитие «сельской геральдики» Донбасса. В конце 1995 г. все города Донецкой области уже имели гербы, на каждом из них присутствовал технический символ. Без гербов оставались села, районы, поселки городского типа. Во время «Второй геральдической реформы» принципы построения гербов постоянно нарушались. Появившаяся литература по геральдике привела к стремлению начинающих геральдистов использовать классические геральдические приемы: деление щита, финифти, геральдические фигуры, аллегории, исторические корни. Реализация полученных знаний нашла воплощение в создании гербов малых населенных пунктов, с учетом истории, направленный развития экономики, поиска символов, отражающих данные направления, и др. Достаточно быстро были преодолены проблемы, связанные с отсутствием законодательства, разрешающего иметь городу, поселку, селу свой герб, и стремлением сохранить поветскую символику. В индустриальном регионе даже села имеют причастность к промышленности — горнодобывающей, энергетической, и это нашло отражение в работе геральдистов. Рассказы

о некоторых эпизодах, этапах данной работы стали основным содержанием данной статьи.

СОВЕТЫ ГЛАВНЫМ МЕХАНИКАМ

Разработка устройства цифровой широкографии 238

Бурков, М. В.

Представлена модель устройства цифровой широкографии, которое позволит повысить скорость проведения неразрушающего контроля в режиме реального времени (с частотой регистрации видеоизображения). Устройство позволяет за один проход исследовать большие площади с сохранением одинакового пространственного разрешения. С использованием специализированных объективов (универсальная конструкция прибора позволяет использовать широкую номенклатуру объективов), устройство позволит решать и исследовательские задачи, требующие высоких значений точности и разрешающей способности. Преимуществом разрабатываемого устройства является возможность гибкой адаптации оптической схемы и программного обеспечения для нужд конкретного заказчика, что невозможно при покупке готового комплекса зарубежных производителей.

Подбор оптимального гидравлического привода для пресса номинальной силой 5МН 245

Анцифоров, А. А., Кривошеин, В. А.

Приведенное в статье исследование посвящено подбору электродвигателя привода гидравлического пресса номинальной силой 5МН. В статье приводятся основные характеристики, описание работы пресса при помощи средств механизации технологического процесса обработки давлением. При использовании программного пакета Deform-3D проведено моделирование процесса штамповки крестовины карданного вала ЗИЛ 130. На основе представленной гидравлической схемы пресса сформирована его топологическая модель в программном пакете ПА-9. Полученная в ходе результатов моделирования технологического процесса штамповки сила деформирования использовалась в топологической модели пресса. При помощи табличной циклограммы приводится последовательность срабатывания конечных включателей и гидравлических распределителей во время технологического процесса штамповки.

НА ПУТИ К ЭФФЕКТИВНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ!

linteh.panor.ru

Научно-практический журнал «ЛИН-технологии: бережливое производство» по вопросам оптимизации производственного процесса, снижения издержек и себестоимости продукции.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ

- Лин-технологии в антикризисном менеджменте.
- Лин-школа.
- Ресурсосбережение.

Распространяется
по подписке
и на отраслевых мероприятиях.
ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКСЫ



80871



П7214



На правах рекламы

Для оформления подписки через редакцию пришлите заявку в произвольной форме по адресу электронной почты podpiska@panor.ru или позвоните по тел. 8 (495) 274-22-22 (многоканальный).

DOI 10.33920/pro-2-2304-01

УДК 621.791.4:539.378.3

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКОЙ

Гадалов, В. Н., д-р техн. наук, профессор,

e-mail: Gadalov-VN@yandex.ru,

Юго-Западный государственный университет, Курск

Губанов, О. М., канд. техн. наук, руководитель проектов по разработке но —
вых видов продукции группы компаний (НЛМК),

e-mail: gubanov_oleg8@mail.ru

ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», Липецк

Петренко, В. Р., д-р техн. наук, профессор,

e-mail: petrenko@vorstu.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж

Филонович, А. В., д-р техн. наук, профессор,

Юго-Западный государственный университет, Курск

305040, Курск, ул. 50-летия Октября, д. 94

394043, Воронеж, ул. Ленина, д. 86

398040, Липецк, площадь Металлургов, д. 2

Описаны особенности формирования соединения тонкостенных конструкций из листовых титановых сплавов, полученных диффузионной сваркой. Достигнутый уровень технологии диффузионной сварки позволяет получать тонкостенные конструкции из титановых сплавов с необходимым комплексом механических свойств, и дальнейшие успехи в развитии и применении диффузионной сварки будут связаны с разработкой комплекса оборудования для контроля качества. Полученные результаты могут быть получены и использованы при создании новых и усовершенствовании уже имеющихся материалов и ресурсосберегающих технологий, в частности для получения качественных тонколистовых соединений из разнородных металлов и сплавов с применением диффузионной сварки в вакууме.

Ключевые слова: титановые сплавы, диффузионная сварка, формирование соединения, тонкостенные конструкции, окислы, дисходная структура, деформация, физический контакт, сварное давление, межфазная граница, толщина обшивки, структурно-неоднородный наполнитель.

FEATURES OF FORMING THE CONNECTION OF THIN-WALLED STRUCTURES MADE OF TITANIUM ALLOYS BY DIFFUSION WELDING

Gadalov, V. N., Doctor of Technical Sciences, prof., Southwest State University, Kursk
Gubanov, O. M., Candidate of Technical Sciences, Project Manager for the development of new types of products of the Group of Companies (NLMK), PJSC Novolipetsk Metallurgical Combine, Lipetsk,

Petrenko, V. R., Doctor of Technical Sciences, Prof., Voronezh State Technical University, Voronezh

Filonovich, A. V., Doctor of Technical Sciences, prof., Southwest State University Kursk

The features of the formation of the connection of thin-walled structures made of titanium alloys obtained by diffusion welding are described. The achieved level of diffusion welding technology makes it possible to obtain thin-walled structures from titanium alloys with the required set of mechanical properties, and further progress in the development and application of diffusion welding will be associated with the development of a set of equipment for quality control. The results obtained can be obtained and used in the creation of new and improvement of existing materials and resource-saving technologies, in particular, for obtaining high-quality thin-sheet joints from dissimilar metals and alloys using diffusion welding in a vacuum.

Keywords: titanium alloys, diffusion welding, joint formation, thin-walled structures, xides; initial structure, deformation, physical contact, welded pressure, interfacial boundary, skin thickness, structurally inhomogeneous filler.

В процессе изготовления тонкостенных изделий из титановых сплавов диффузионной сваркой возникает неоднородность в приложении внешних давлений при соединении обшивок с наполнителем и заданной температуре сварки. При этом использование высоких давлений, обеспечивающих гарантируемую реализацию процесса сварки, приводит к недопустимой деформации соединяемых элементов. При низких давлениях, ограничивающих устойчивость тонколистовых элементов, качество соединения во многих случаях оказывается неудовлетворительным и характеризуется нестабильностью механических характеристик.

Как известно, формирование диффузионного соединения основано на сближении ювенильных (свободных от окисления пленок) поверхностей свариваемых деталей в вакууме при нагреве их несколько выше температуры рекристаллизации с приложением небольшого сжимающего усилия и взаимной диффузии на границе раздела соединяемых поверхностей.

Цель работы — поскольку процесс диффузионной сварки (ДС) протекает при низких давлениях, то при решении проблемы изготовления тонкостенных конструкций на одно из главных направлений выдвигаются задачи систематического изучения и анализа физико-химических процессов, протекающих при сварке и контролирующих взаимодействие свариваемых поверхностей с целью наиболее рационального построения и оптимизации технологического процесса ДС.

Титановые сплавы характеризуются следующими свойствами, определяющими их свариваемость. В первую очередь это способность титана растворять большое количество кислорода и, как следствие этого, с высокой скоростью очищать поверхность от окислов и понижать концентрацию кислорода в поверхностных слоях, а с другой стороны — легко переходить в окисленное состояние даже в глубоком вакууме. При температурах $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ на внешних

и контактных поверхностях в вакууме 2,6 Па в процессе нагрева успевают образоваться не только окисные пленки, но и хрупкие газонасыщенные слои (охрупченные слои). С повышением температуры состав газовой фазы между свариваемыми поверхностями существенно отличается от состава в сварочной камере. По мере перемещения от краевой зоны сварки к центральной парциальное давление кислорода падает. Если в краевой части свариваемых элементов имеются процессы окисления, сопровождающиеся ростом окисленного слоя, то в центральной части могут создаваться условия для очистки поверхности от окислов. Такое понижение давления обусловлено процессом «автовакуумирования» в результате взаимодействия поверхностей с остаточными газами. Возможность проникновения газа из камеры в контактный зазор определяется соотношением количества газа, поступающего в зону контакта за счет диффузии, и прореагировавшего с краевыми участками образцов в процессе окисления. В зависимости от размеров свариваемых элементов величины контактного зазора и допустимого краевого непровара расчетно-аналитическим методом может быть определена необходимая величина парциального давления кислорода в сварочной камере, при котором в зоне контакта при температуре сварки поверхности будут очищены от окисных пленок.

Следующим важным свойством титана и его сплавов является большое многообразие исходных микроструктур и высокая чувствительность к ним механических свойств и высокотемпературных характеристик. Поэтому микроструктурное состояние свариваемых элементов необходимо рассматривать как фактор управления качеством диффузионного соеди-

нения. Это позволило разработать упрощенную классификацию исходной микроструктуры применительно к диффузионной сварке.

Выделяются четыре типа структуры:

1. Мелкозернистая;
2. Пластинчатая (мелко пластичная) без видимых границ исходных β -зерен;
3. С видимыми границами исходных β -зерен;
4. Смешанная, характеризуемая объемным содержанием зон с пластинчатой α -фазой).

Каждому типу структуры соответствуют определенные значения удельного сварочного давления, при котором обеспечивается получение равнопрочных с основным металлом сварных соединений (V_k). При $V_k < 10\%$ сплав относится к первому типу структуры, а при $V_k > 50\%$ — к третьему типу. Наибольшее влияние на формирование качественного соединения микроструктурное состояние соединения элементов оказывает при сварке тонкостенных конструкций. Как правило, элементы таких конструкций изготавливают из листовых материалов с исходной мелкозернистой структурой, которая характеризуется низким сопротивлением высокотемпературной деформации. Прочность диффузионного соединения (например, элементов сотового заполнителя с обшивками), получаемого при условии $P < 0_{пч}$, составляет не более половины от прочности основного материала. Это связано с тем, что стадией, лимитирующей формирование соединения, в этом случае является активация свариваемых поверхностей, которая из-за развития физического контакта между неактивными поверхностями и недостаточной степени деформации металла в зоне стыка под действием внешних напряжений реализуется только на части поверхности соединения.

Третьим важным свойством титана и его сплавов является локальная деформация свариваемых поверхностей, сопровождающаяся образованием субструктурного рельефа в виде полос скольжения. Последние являются местами выхода дислокаций, которые образуются под действием собственных напряжений и в условиях сварки должны рассматриваться как активные зоны с высокой реакционной способностью. Внутренние напряжения, обусловленные перестройкой гексагональной α -фазы в кубическую β -фазу при полиморфном $\alpha \rightarrow \beta$ -превращении, — источник активации свариваемых поверхностей, не приводящих к макродеформации свариваемых элементов. Деформация контактных поверхностей при диффузионной сварке является необходимым условием образования качественного соединения, а ее величина V_k , требуемая для реализации процессов развития физического контакта и активации свариваемых поверхностей, зависит от ряда факторов шероховатости и ориентирования следов обработки соединяемых поверхностей, их физико-химического состояния и исходной микроструктуры.

В процессе сварки деформации подвергается весь объем соединяемых элементов, поэтому более удобным критерием образования соединения с заданными свойствами является величина остаточной пластической деформации деталей (ϵ). При повышении класса чистоты обработки свариваемой поверхности от Ra 1,35 мкм до Ra 0,01 мкм величина V_k уменьшается от 8 до (2-3) %. При наличии на свариваемых поверхностях титана окисленного металла, выявляемого в виде «охрупченного» слоя, величина ϵ резко возрастает и может достигать (15-20) %. Существенное влияние на величину V_k оказывает по-

следовательность реализации стадий процесса формирования соединения. Если стадия развития физического контакта опережает стадию активации, то $\epsilon > 10\%$. Если же физический контакт развивается между «активными» поверхностями, тогда ϵ будет (1-3) %.

При изготовлении тонкостенных конструкций деформация должна удовлетворять требованию $\epsilon < 2\%$. Несоблюдение этого условия приводит к неисправимому браку изготавливаемой конструкции — к потере устойчивости ее элементов. Поэтому при изготовлении тонкостенных конструкций диффузионной сваркой необходимо стремиться к тому, чтобы развитие контакта происходило между поверхностями с высокой реакционной способностью к взаимодействию. На практике из-за ряда технологических трудностей создать такие условия не всегда возможно.

На основе анализа результатов выполненных исследований можно сформулировать основные пути, направленные на повышение качества и стабильности сварных соединений тонкостенных элементов.

1. Процесс формирования физического контакта нужно осуществлять в области низких температур (20-500) °C, когда взаимодействие стыкуемых поверхностей с активными газами защитной атмосферы не приводит к их насыщению кислородом (азотом) и образованию на поверхности охрупченных слоев и окисных пленок. При этом имеется возможность прикладывать высокое сварочное давление. На втором этапе сварки с целью развития процессов взаимодействия за счет реализации начала термической активации температуру сварки необходимо повысить до области температур ($\alpha + \beta$) \rightarrow β -превращения. Возможно повышение температуры до β -области. Давление при этом

не играет существенной роли и может быть намного ниже напряжения. Практическая реализация процесса по этой схеме требует разработки устройств по созданию больших сварочных давлений.

2. Принцип формирования физического контакта следует осуществлять между поверхностями с высокой реакционной способностью. Это достигается при нагреве на сведенных в контакт свариваемых элементах до области температур $(\alpha + \beta) \rightarrow \beta$ -превращения в высоком вакууме или очищенном аргоне, что способствует более интенсивному очищению поверхностей от окислов, образовавшихся в процессе нагрева, и приводит к уменьшению значений деформации, необходимой для активации, а также обеспечивает активацию поверхностей под действием внутренних напряжений. Сварочное давление нужно прикладывать после выдержки при температуре сварки. При этом его величина $P \ll 0_{\text{пу}}$.

При проведении процесса диффузионной сварки по этой схеме повышенные требования предъявляются к контролируемой атмосфере и шероховатости поверхности. Параметр шероховатости не должен превышать ($R_a = 0,25$) мкм. В противном случае процессом, контролирующим образование соединения, станет стадия развития физического контакта, и все усилия, направленные на активирование контактных поверхностей, не принесут ожидаемого эффекта.

Следует отметить, что при переходе от лабораторных образцов к промышленным конструкциям появляется ряд трудностей, связанных с созданием гарантированного зазора между свариваемыми поверхностями.

3. Перспективным путем интенсификации процесса формирования соединения являются способы, основанные на структурном управлении

процессом сварки. Повышение устойчивости заполнителя за счет перевода его структуры в крупнозернистую пластинчатую, характеризуемую высоким сопротивлением пластической деформации, позволяет увеличить давление и интенсифицировать процессы деформации металла в зоне контакта. Для такого структурного сочетания соединяемых элементов процесс формирования соединения, обеспечивающий его прочностные характеристики на уровне основного материала, реализуется только при соблюдении следующего условия: $(\delta_3/\delta_0) < 0,35$, где δ_3 и δ_0 — толщина материала заполнителя и обшивки. Вследствие контактного упрочнения материала обшивки при $(\delta_3/\delta_0) > 0,35$ деформация в контакте не достигает необходимой величины и процесс активации реализуется не по всей поверхности контакта.

Следует отметить, что выполнение условия $(\delta_3/\delta_0) < 0,35$, целесообразное с технической точки зрения, в ряде случаев оказывается нежелательным, так как приводит к увеличению массы конструкций вследствие большой толщины обшивки. Поэтому при диффузионной сварке конструкций с отношением толщины соединяемых элементов $(\delta_3/\delta_0) > 0,35$ следует применять структурно неоднородный заполнитель, состоящий из слоев величиной $P = (3-4) \delta_3$ с мелкозернистой структурой в поверхностном слое контактной зоны и крупнозернистой пластинчатой в остальном объеме. При возникновении трудностей с получением структурно неоднородного заполнителя процесс сварки можно проводить в два этапа. На первом формируют физический контакт, при котором возникают «слабые» химические связи. В зоне контакта образуется устойчивая межфазная граница. С целью дальнейшей актива-

ции процесса и развития стабильной межфазной границы температуру сварки повышают в β -область.

Таким образом, достигнутый уровень технологии диффузионной сварки (ДС) позволяет получать тонкостенные конструкции из титановых сплавов с необходимым комплексом механических свойств и дальнейшие успехи в развитии и применении ДС будут связаны с разработкой комплекса оборудования для ДС и контролем качества. Полученные результаты могут быть использованы при создании новых и усовершенствовании уже имеющихся материалов и ресурсосберегающих технологий, в частности для получения качественных тонколистковых соединений из разнородных металлов и сплавов с применением диффузионной сварки в вакууме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петренко, В.Р.** Сварка титана со сталью: монография / В.Р. Петренко, Л.С. Киреев, В.В. Пешков // Воронеж: Воронеж. госуд. технич. ун-т, 2004. — 173 с.
2. **Петренко, В.Р.** Повышение служебных характеристик титановых диффузионно-сварных слоистых конструкций / В.Р. Петренко, В.В. Пешков, В.Ю. Полевин // Сварочное производство. — 2005. — № 7. — С. 37–41.
3. **Петренко, В.Р.** Металловедение диффузионной сварки титана / В.Р. Петренко. Под общ. ред. В.В. Пешкова. — М.: ИЦ «Технология», 2005. — 315 с.
4. **Петренко, В.Р.** Технологические основы получения сварных титановых слоистых оболочковых конструкций / В.Р. Петренко. — М., 2006. — 32 с.
5. **Гадалов, В.Н.** Диффузионная сварка слоистых титано-алюминиевых панелей / В.Н. Гадалов, А.С. Шишков // Технология металлов. — 2009. — №10. — С. 28–31.
6. **Петренко, В.Р.** Физика и химия и металловедение диффузионной сварки титановых тонкостенных оболочковых конструкций: монография / В.Р. Петренко. — Воронеж: ВГТУ, 2009. — 341 с.
7. **Жорник, В.А.** Моделирование процессов спекания порошковых покрытий при тепловом и механическом воздействии / В.А. Жорник, Ю.А. Прокопенко // Вестник Тульского госуд. техн. ун-та. Технич. науки. — 2010. — Т. 16, № 1. — С. 59–66.
8. **Емельянов, С.Г.** Изготовление пустотелых биметаллических титано-алюминиевых панелей диффузионной сваркой / С.Г. Емельянов, В.Н. Гадалов, Д.В. Пономарев // Технология металлов. — 2010. — № 7. — С. 25–29.
9. **Пешков, В.В.** Диффузионная сварка титановых слоистых конструкций аэрокосмической Техники / В.В. Пешков, А.Б. Булков, В.Р. Петренко и др. Под ред. В.С. Рачука. — Воронеж: ВГТУ, 2012. — 312 с.
10. **Макаров, Э.Л.** Теория свариваемости сталей и сплавов / Э.Л. Макаров. Под ред. Э.Л. Макарова. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 487 с.; 2-е изд. — 2018. — 551 с.
11. **Устинов, А.И.** Диффузионная сварка сталей с оловянной бронзой через порошковые прослойки никеля и меди / А.И. Устинов, Ю.В. Фальченко, Т.В. Мельнеченко и др. // Автоматическая сварка. — 2015. — № 9. — С. 15–21.
12. **Пешков, В.В.** Влияние микроструктуры контактных поверхностей на образования соединения при диффузионной сварке / В.В. Пешков, А.Б. Булков, С.М. Ларсен и др. // Вестник Воронежского госуд. техн. ун-та. — 2017. — Т. 13, № 2. — С. 11–14.
13. **Пешков, В.В.** Диффузионно-сварные титановые тонкостенные слоистые конструкции / В.В. Пешков, А.Б. Булков, В.И. Максименко и др. // Вестник ВГТУ. — 2018. — Т. 14, № 1. — С. 138–146.

DOI 10.33920/pro-2-2304-02

УДК 634.573

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ

Сундетов, М. А.,

e-mail: marat.sundetov@mail.ru

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Мухамбетов, С. Б., канд. техн. наук, доцент

СГТУ им. Ю. А. Гагарина, Саратов

Киселёв, В. Л., канд. техн. наук, доцент

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

410054, Саратов, Политехническая ул., д. 77

В работе изучено влияние режимов и параметров фрезерования концевой фрезой на энергоёмкость процесса резания. Представлен образец методики расчета энергоёмкости, режимов и параметров фрезерования. Результаты работы позволят на этапе проведения технологической подготовки производства подбирать наиболее энергоёмкие режимы резания для фрезерования концевой фрезой.

Ключевые слова: энергоёмкость, режимы и параметры резания, концевая фреза, фрезерование.

ENERGY INTENSITY OF MACHINING DEPENDING ON CUTTING CONDITIONS ON THE EXAMPLE OF MILLING WITH AN END MILL

Sundetov, M. A.,

BMSTU, Moscow

Mukhambetov, S. B., Ph. D. tech. Sciences, Associate Professor

SGTU im. Yu. A. Gagarina, Saratov

Kiselev, V. L., Ph. D. tech. Sciences, Associate Professor

BMSTU, Moscow

In this work, the influence of modes and parameters of milling with an end mill on the energy intensity of the cutting process is studied. An example of a methodology for calculating energy consumption, modes and milling parameters is presented. The results

of the work will allow at the stage of technological preparation of production to select the most energy-intensive cutting modes for milling with an end mill.

Keywords: energy consumption, cutting modes and parameters, end mill, milling.

Машиностроительное производство имеет высокий уровень электрификации оборудования [1]. При этом механическая обработка составляет основную долю энергозатрат, снижение которых является современной задачей машиностроительного производства. Для этого целесообразно не только применять энергоэффективное оборудование, но и использовать эффективные режимы и параметры резания при его эксплуатации [2]. Тем самым становится возможным получение минимальной энергоемкости процесса резания на этапе ТПП. В работе будет проведен анализ влияния на энергоемкость режимов и параметров, участвующих в процессе фрезерования плоскости концевой фрезой.

Изначально энергоемкость процесса резания представляет собой количество энергии, затрачиваемой режущим инструментом, на отделение в виде стружки единицы объема срезаемого слоя. Таким образом энергоемкость обработки концевой фрезой описывается следующей формулой [3]:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{\theta}, \quad (1)$$

где \mathcal{E} — энергоемкость; A — работа резания; θ — объем снятого материала.

При этом [3]:

$$A = N \cdot \tau \quad (2)$$

$$\theta = Q \cdot \tau \quad (3)$$

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} \quad (4)$$

$$Q = \frac{B}{\pi \cdot D} \cdot \frac{t \cdot S_z \cdot Z \cdot V}{1000} \quad (5)$$

где τ — удельная единица времени; N — мощность резания; Q — производительность фрезерной обработки;

P_z — главная составляющая силы резания; V — скорость резания; B — ширина фрезерования; t — глубина фрезерования; S_z — подача на зуб фрезы; Z — количество зубьев фрезы; D — диаметр обрабатываемой фрезы.

Преобразовав (1), (2), (3), (4) и (5) получаем выражение, описывающее энергоемкость обработки концевой фрезой:

$$\mathcal{E} = \frac{10 \cdot \pi \cdot D \cdot V \cdot P_z}{612 \cdot B \cdot t \cdot S_z \cdot Z} \quad (6)$$

Рассматриваемые методики основаны на расчете главной составляющей силы резания P_z , которая может быть рассмотрена:

- с помощью аналитической формулы [4]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^{u \cdot Z \cdot K_{mp}}}{D^q \cdot n^w} \quad (7)$$

где C_p , x , y , u , q , w — коэффициенты для расчета силы резания при фрезеровании концевой фрезой из твердого сплава по конструкторской стали; K_{mp} — коэффициент, учитывающий влияние материала на силовые зависимости;

- и с помощью аналитической формулы [5]:

$$P_z = 0,0125 \cdot C_{p_z} \cdot K_{mp} \cdot C_{HBP} \times \\ \times D^{z_5} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{q_5} \cdot S_z^{y_5} \cdot HB^{n_6} \cdot Z \cdot B \quad (8)$$

C_{p_z} , z_5 , q_5 , y_5 — коэффициенты для расчета силы резания при фрезеровании концевой фрезой из твердого сплава; K_{mp} , C_{HBP} , n_6 — коэффициенты, характеризующие материал и условия его обработки;

HB — твердость материала по Бриггеллю.

Таким образом, преобразовав формулы (6) с (7) и (6) с (8), получаем выражения для определения энергоем-

кости фрезерной обработки концевой фрезой:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{100 \cdot \pi \cdot C_p \cdot K_{mp} \cdot D^{(1-q)} \cdot t^{(x-1)} \cdot S_z^{(y-1)} \cdot B^{(u-1)}}{612 \cdot n^w} & (9.1) \\ \frac{125 \cdot \pi \cdot C_{p_z} \cdot K_{Mp} \cdot C_{HBP} \cdot D^{(z_5-1-q_5)} \cdot t^{(q_5-1)} \cdot S_z^{(y_5-1)} \cdot HB^{n_6}}{612000} & (9.2) \end{cases}$$

Проанализировав формулы (9.1) и (9.2), выясняем, что энергоемкость обработки концевой фрезой зависит от:

1. Режимов и параметров резания: глубины и ширины фрезерования, подачи на зуб фрезы и количества оборотов фрезы, непосредственно влияющих на энергоемкость фрезерования.

2. Типа и твердости материала, зависящих от результатов конструкторской работы и уже являющихся исходными данными к этапу ТПП.

3. Диаметра концевой фрезы, зависящего от размеров обрабатываемого контура и результатов ТПП.

Далее изучим влияние режимов и параметров фрезерования концевой фрезой на энергоемкость процесса резания. Для этого проведем ряд вычислений по представленным формулам. Вычисления проведем с увеличением одного из режимов или параметров резания, при этом остальные параметры будут сохранять значения из первого расчета. Обрабатываемым материалом является конструкционная сталь с твердостью HB 206. Режущим инструментом является концевая фреза с диаметром $D = 10$ мм и количеством зубьев $Z = 4$. Значения поправочных коэффициентов для формул (9.1) и (9.2) представлены в табл. 1. Значения параметров и режимов резания для каждого расчета с результатами расчетов энергоемкости представлены в табл. 2.

Анализируя результаты табл. 2, делаем выводы:

- при увеличении подачи на зуб значение энергоемкости уменьшается по обеим формулам;
- при увеличении частоты оборотов фрезы значение энергоемкости увеличивается по формуле (9.1). На формулу (9.2) режим не имеет влияния;
- при увеличении глубины фрезерования значение энергоемкости уменьшается по обеим формулам;
- при увеличении ширины фрезерования значение энергоемкости не меняется по обеим формулам.

Итак, становится ясным, что при увеличении *подачи на зуб и глубины фрезерования* энергоемкость уменьшается, что хорошо влияет на энергоэффективность. Однако при увеличении *частоты оборотов фрезы* увеличивается и энергоемкость, что плохо влияет на энергоэффективность.

На практике участвующие в расчетах режимы резания назначаются по определенным методикам таким образом, чтобы обеспечивалась наиболее экономичная и производительная обработка поверхности с получением требований по точности и шероховатости. Проведем расчеты энергоемкости при назначении режимов резания (S_z, n), полученных по конкретным методикам:

1. Методика «Режимы резания металлов» под редакцией Ю.В. Барановского [6]: справочник основан на нормативах для машинострои-

Таблица 1

Поправочные коэффициенты формул (9.1) и (9.2)

Формула (9.1)	$C_p = 12,5$	$x = 0,85$	$y = 0,75$	$u = 1$	$q = 0,73$	$w = -0,13$	КМр
Формула (9.2)	$C_{pz} = 25\ 700$	$z_5 = 0,142$	$q_5 = 0,663$	$y_5 = 0,894$	$K_{MP} = 1$	$C_{HBP} = 0,00056$	$\eta_6 = 1,4$

Таблица 2

Значения параметров и режимов резания и результаты расчетов энергоёмкости

№ расчета	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Частота оборотов фрезы n , об/мин	Глубина фрезерования t , мм	Ширина фрезерования B , мм	Энергоёмкость Q , Дж/мм ³	
					Формула 9.1	Формула 9.2
1	0,04	2750	5	5	58,73	39,47
2	0,05	2750	5	5	55,54	38,55
3	0,06	2750	5	5	53,07	37,81
4	0,04	2875	5	5	59,07	39,47
5	0,04	3000	5	5	59,395	39,47
6	0,04	2750	6	5	57,14	37,12
7	0,04	2750	7	5	55,84	35,24
8	0,04	2750	5	6	58,73	39,47
9	0,04	2750	5	7	58,73	39,47

тельного производства, полученных на основе «опытных» данных;

2. Методика «Выбор режимов резания» Даниленко Б. Д., Зубков Н. Н. [5]: по методическому указанию осуществляется расчет с учетом поправочных коэффициентов, учитывающих множество факторов касательно параметров инструмента, свойств заготовки и типа обработки;

3. Калькулятор режимов резания Sandvik «CoroPlus® ToolGuide» [7]: онлайн-сервис, позволяющий произвести расчет режимов резания

для обработки инструментом данной фирмы.

Для расчетов энергоёмкости принимаем исходные данные, представленные в табл. 3.

Рассчитанные по методикам режимы резания представлены в табл. 4. Сравнительная диаграмма результатов расчетов энергоёмкости представлена на рисунке.

Проанализировав сравнительную диаграмму результатов, можно сделать следующие выводы:

- формула 9.2 показывает меньшие значения энергоемкости, кроме методики 3;
- наименьшую разницу показаний энергоемкости показывает методика «Выбор режимов резания» Даниленко Б. Д., Зубков Н. Н.;
- наибольшую разницу показаний энергоемкости показывает методика «Режимы резания металлов»

Таблица 3

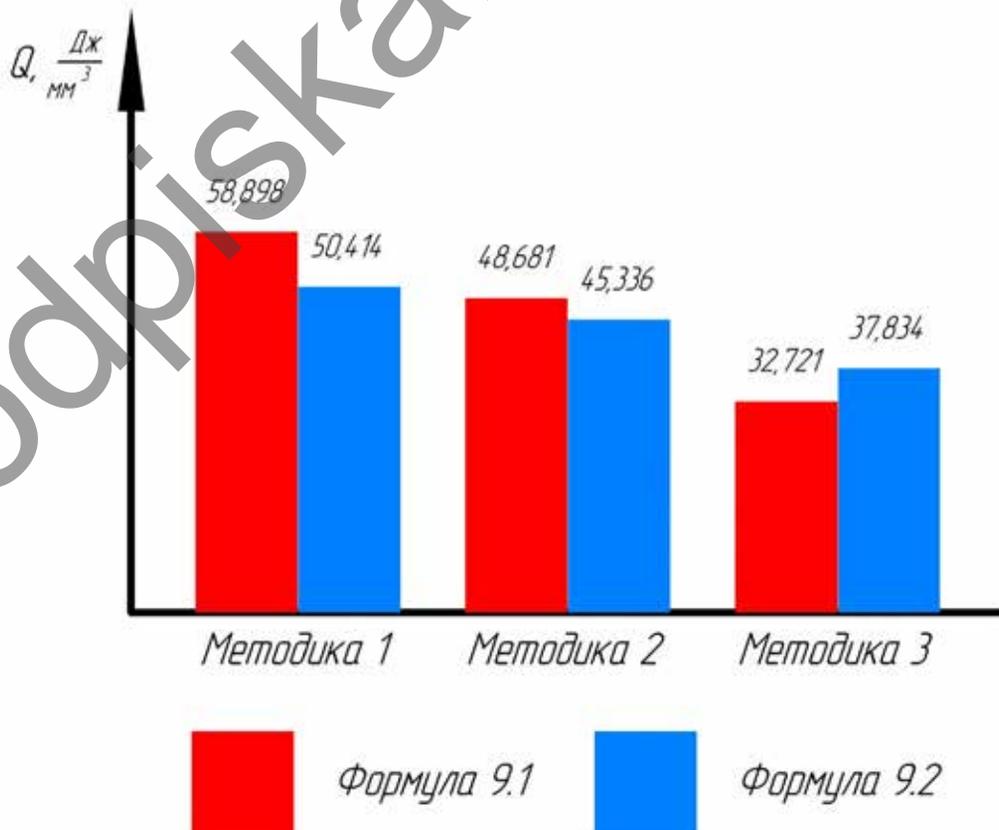
Исходные данные

Диаметр фрезы D , мм	Количество зубьев фрезы Z , шт	Глубина фрезерования t , мм	Ширина фрезерования B , мм	Твердость обрабатываемого материала, НВ
10	4	2,5	2,5	206

Таблица 4

Рассчитанные режимы резания

№ методики	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Частота оборотов фрезы n , об/мин
1	0,036	1032
2	0,098	1638
3	0,54	2050



Результаты расчета энергоемкости

под редакцией Ю.В. Барановского;

- самыми энергоемкими режимами резания являются режимы, назначенные по методике «Калькулятор режимов резания Sandvik «CoroPlus® ToolGuide».

Таким образом, в работе было изучено влияние параметров и режимов фрезерования плоскости концевой фрезой на энергоемкость процесса резания. А также были получены методики расчета энергоемкости, по которым были проведены расчеты энергоемкости по полученным режимам резания в соответствии с выбранными методиками расчета режимов резания. В результате рекомендуемой методикой расчетов энергоемкости является калькулятор режимов резания Sandvik «CoroPlus® ToolGuide»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сундетов, М. А., Мухамбетов, С. Б.**, энергоемкость механической обработки при изготовлении изделий машиностроения. УДК 663.475.
2. **Карпов, А. В.** Показатели энергетической эффективности процесса резания. Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет». УДК 621.9.01.
3. **Новиков, Ф. В., Кленов, О. С.** Условия уменьшения энергоем-

кости и повышения производительности механической обработки // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Технологии в машиностроении. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. — № 17 (1239). — С. 38–44. — Библиогр.: 6 назв. — ISSN 2079-004X.

4. **Козлов, В. Н.** Расчет режимов, сил и мощности резания. УДК 621.9.01:681.5. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент» для студентов, обучающихся по направлению 150700 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств». — Томск: Изд. ТПУ, 2014. — 12 с.

5. **Даниленко, Б. Д., Зубков, Н. Н.** Выбор режимов резания (продольное точение, сверление спиральными сверлами, фрезерование концевыми фрезами): учеб. пособие / Под ред. В. С. Булошниковой. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 52 с.: ил. ISBN 5-7038-2686-1.

6. **Режимы резания металлов** / Под редакцией Ю.В. Барановского. Справочник. Изд. 3-е, перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1972. УДК 621.91.04 (031).

7. **Калькулятор режимов резания Sandvik «CoroPlus® ToolGuide»** — Эл. ресурс. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/pages/tool-guide.aspx> (дата обращения: 29.01.2023).

Для оформления подписки через редакцию пришлите заявку в произвольной форме по адресу электронной почты podpiska@panor.ru или позвоните по тел. 8 (495) 274-22-22 (многоканальный).