УДК 621.001.4

Сравнительный анализ свойств износостойких покрытий для повышения стойкости сверл

П. А. Тополянский, С. А. Ермаков, Н. А. Соснин, А. П. Тополянский

Рассмотрены современные технологии нанесения тонкопленочных износостойких покрытий: CVD и PVD-процессы, а также новая технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ). Данный метод относится к процессам бескамерного химического осаждения покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой. Приведены сравнительные физико-механические и трибологические характеристики различных износостойких покрытий, а также результаты модельных и промышленных испытаний технологии финишного плазменного упрочнения применительно к упрочнению сверл, изготовленных из порошковой быстрорежущей стали.

Ключевые слова: ***модификация, PVD-процесс, CVD-процесс, финишное плазменное упрочнение инструмента, износостойкое нанопокрытие, трибологические испытания.***

Одним из основных направлений повышения эффективности металлорежущего инструмента является увеличение его ресурса за счет применения тонкопленочных износостойких покрытий, состоящих, например, из различных тугоплавких соединений: TiN, TiCN, TiAIN, ZrN, ZrCN, ZrHfN, CrN. Свойства данных покрытий хорошо изучены, а сами покрытия активно применяются в промышленности. Одновременно в мировой практике используются многокомпонентные и композитные нанопокрытия, уникальность которых заключается в высокой объемной доле границ раздела фаз и их прочности, отсутствии дислокаций внутри кристаллов, возможности изменения соотношения объемных долей кристаллической и аморфной фаз, взаимной растворимости металлических и неметаллических компонентов. Это обеспечивает улучшенные физико-механические свойства покрытий, такие как твердость, упругость, усталостная прочность, жаро- и коррозионная стойкость. Кроме того, данные покрытия имеют повышенные трибологические характеристики. Важно отметить, что используемый термин «нано» применительно к покрытию свидетельствует не о толщине последнего, а о наличии в нем элементов структуры нанометровых размеров. Это могут быть покрытия, состоящие из одного слоя нанометровой толщины (нанослоя), или массивное многослойное покрытие, состоящее из большого числа нанослоев. К нанопокрытиям следует также отнести и однослойные покрытия, в том числе покрытия большой толщины, имеющие нанокристаллическое строение.

Исходя из основных принципов трения и износа можно предположить, что повышенная твердость поверхностного слоя является основным критерием увеличения ресурса. При реальных же условиях контакта деталей и инструмента минимизация износа зависит от упругости и стойкости к деформациям поверхностного слоя не меньше, чем от твердости. Поэтому к износостойким покрытиям следует относить материалы с оптимальными значениями твердости и модуля упругости и имеющие повышенные трибологические свойства (низкий коэффициент трения, минимальную длительность приработки, минимальное

тепловыделение при трении, минимальный износ трущихся поверхностей). Дополнительно такие покрытия могут снижать уровень возникающих напряжений, предотвращать растрескивание, трибохимические эффекты, быть диэлектрическими. При этом использование современных износостойких покрытий должно основываться на обеспечении максимальных адгезионных характеристик с основным материалом.

Выбор оптимального износостойкого покрытия и технологии его нанесения в целях повышения долговечности конкретного инструмента является актуальной проблемой. В представленной работе приведен сравнительный анализ свойств износостойких покрытий и соответственно технологий их нанесения на основе определения физико-механических и трибологических характеристик материала покрытия для упрочнения сверл, в том числе изготовленных из порошковой быстрорежущей стали.

Технологии нанесения износостойких тонкопленочных покрытий

В качестве основных современных технологий нанесения износостойких покрытий для металлорежущего инструмента используются процессы химического (CVD-chemical vapor deposition) и физического (PVD-physical vapor deposition) осаждения из газовой фазы. Отличие этих процессов друг от друга состоит в том, что в технологиях PVD исходные твердые материалы за счет испарения или распыления переводятся в газовую (паровую) фазу, которая имеет тот же состав, что и покрытие, а сам процесс осуществляется только в вакууме. При CVD-процессах в качестве исходных материалов используются газы, составы газовой фазы и покрытия существенно различаются, покрытие образуется за счет прохождения химических реакций используемых реагентов, сами процессы в большинстве случаев проводятся при атмосферном давлении в специальных камерах, в отдельных случаях — в вакуумных камерах.

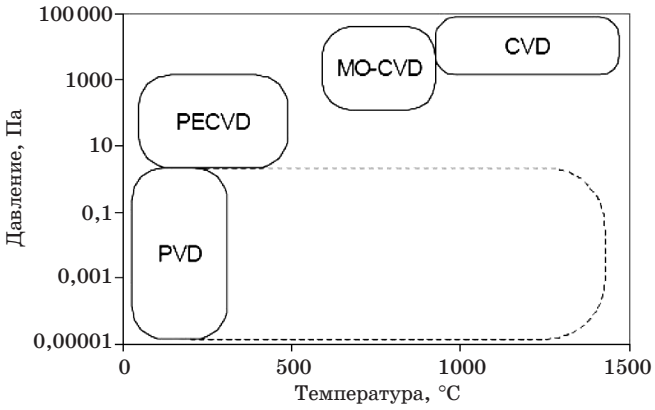


Рис. 1. Виды процессов осаждения покрытий в зависимости от параметров давления и температуры их проведения:

CVD — химическое осаждение покрытий; PVD — физическое осаждение покрытий; PECVD — химическое осаждение покрытий с плазменной активаций; MO-CVD — химическое осаждение покрытий с использованием элементоорганических соединений

Сравнительные характеристики технологий и оборудования для CVD- и PVD-процессов приведены в табл. 1 [1].

Из анализа мировых достижений в области нанесения покрытий известно, что понизить температуру нагрева изделий в CVD-процессах можно при использовании в качестве реагентов образования газовой фазы элементоорганических соединений и при помощи плазменной активации (рис. 1) [2]. При этом уменьшение температуры процесса будет способствовать исключению негативных явлений от термического воздействия и возможности более широкого использования различных материалов основы.

Применение элементоорганических соединений для нанесения покрытий повышает уровень экологической безопасности, с учетом их нетоксичности (в отличие от широко применяемых для этих целей силанов, боранов или галогенидов при традиционных CVD-процессах), а также уровень взрывоопасности, с учетом их использования в жидком состоянии. Кроме этого элементоорганические соединения могут содержать все необходимые компоненты для получения покрытий в единой субстанции, что повышает эффективность контроля за технологическим процессом и воспроизводимость свойств наносимых покрытий.

Плазменная активация обеспечивает повышенное качество подготовки поверхности подложки, ведет к более быстрому прохождению химических реакций, а также к более высоким скоростям осаждения покрытия.

Таблица 1

Сравнительные характеристики CVD- и PVD-методов нанесения тонкопленочных износостойких покрытий

Характеристика	CVD-метод	PVD-метод
Рабочее давление при нанесении покрытия	Атмосферное (CVD) или вакуум для активируемого плазмой процесса (PECVD)	Вакуум
Температура изделий при нанесении покрытия	700–1100 °С (CVD) 400–500 °С (PECVD)	250–500 °С
Зона поверхности изделий, на которую наносится покрытие	Все поверхности изделий, в том числе внутренние с внешним доступом	При неподвижном изделии — только зона, непосредственно обращенная к источнику ионов, при вращении — вся рабочая поверхность, кроме закрытых внутренних зон
Максимальные габаритные размеры и форма обрабатываемых изделий	Габаритные размеры ограничены размерами реакционных и вакуумных камер; возможность нанесения на разнотипные изделия	Габаритные размеры ограничены размерами вакуумных камер; невозможность нанесения покрытий на разнотипные изделия, паяный инструмент, инструмент из разнородных материалов, сложнопрофильный инструмент, внутренние поверхности, протяженные и глухие полости и отверстия
Ограничения в исходном материале инструмента	Нельзя наносить покрытия на закаленный инструмент с низкой температурой отпуска (например, изготовленный из стали У10, 9ХС, ХВГ, ШХ15, быстрорежущей стали и др.)	Низкие адгезионные свойства при нанесении покрытий на инструмент из материала с низкой температурой отпуска (например, изготовленные из стали У10, 9ХС, ХВГ, ШХ15 и др.)
Предварительная подготовка инструмента	Многооперационная подготовка — обезжиривание, виброабразивная обработка, ультразвуковая мойка, промывка, сушка, обезвоживание	Особо тщательная многооперационная подготовка — мойка, сушка, обезвоживание, подогрев
Толщина наносимого покрытия	2–10 мкм (покрытия больше 3 мкм увеличивают радиус скругления режущей кромки)	0,1–6 мкм (покрытия толщиной 3–6 мкм увеличивают радиус скругления режущей кромки)
Состав основных наносимых покрытий	TiC, TiN, TiCN, Al2O3 и др.	TiN, TiC, TiCN, TiAlN, ZrC, HfN, HfC, CrN, Al_2O_3 и др.
Твердость наносимых покрытий, ГПа	20–30	20–50
Коэффициент трения покрытия по стали	0,4–0,6	0,1–0,5
Температура окисления покрытия	400–600 °С	400–1100 °С
Остаточные напряжения в поверхностном слое металла	Высокие растягивающие	Растягивающие
Необходимость проведения термической обработки после нанесения покрытия	Требуется дополнительная термическая обработка для снятия остаточных напряжений	Не требуется
Расходные материалы	Высокочистые химические материалы	Специальные катоды (мишени) вакуумного переплава
Дополнительные операции, связанные с увеличением трудоемкости процесса	Загрузка, выгрузка, охлаждение и чистка камеры	
Дополнительные затраты, связанные с увеличением себестоимости нанесения покрытия	Проектирование и изготовление оснастки для установки и позиционирования конкретного инструмента	

Продолжение табл. 1

Характеристика	CVD-метод	PVD-метод
Примеры габаритных размеров камер установок для напыления	∅ 325 × 1250 мм (Bernex BPX 325S) ∅ 530 × 1250 мм (Bernex BPX Pro 530L)	Ш 400 мм, Г 380 мм, В 520 мм (PLATIT PL70), ∅ 400 мм (UNICOAT 600), ∅ 600 мм, Н 600 мм (ННВ 6,6-И1)
Примеры максимальной загрузки камер установок для напыления	По твердосплавным пластинам — 200 кг (Bernex BPX 325S), 400 кг (Bernex BPX Pro 530L)	Для установки PLATIT PL70 — осевой инструмент ∅ 10 × 70 — 162 шт.; червячные фрезы ∅ 80 × 180 — 6 шт.; пластины ∅ 20 × 6 — 1248 шт.; для установки UNICOAT 600 — осевой инструмент ∅ 20 × 60 мм — 108 шт.; червячная фреза ∅ 80 × 80 мм — 32 шт.
Типичное время цикла нанесения покрытия	3–5 ч на конкретную загрузку инструмента	3 ч (откачка, нагрев — 50 мин, очистка, травление — 20 мин, осаждение покрытия толщиной 2 мкм — 90 мин, охлаждение — 20–30 мин)
Экологические проблемы	Токсичность используемых реагентов, взрывоопасность	Необходимость постоянной вытяжки, обеспечивающей отсутствие паров масла в рабочих помещениях и местной вытяжной вентиляции, включаемой при открытии вакуумной камеры и выгрузке инструмента
Количество обслуживающего персонала	Оператор установок вакуумного напыления (PECVD), вакуумщик, электрик, электронщик, рабочие для подготовки инструмента	Оператор установок вакуумного напыления, вакуумщик, электрик, электронщик, слесарь, рабочие для подготовки инструмента
Минимальная площадь под оборудование	100–150 м^2 (под напыление), 100–150 м^2 (для подготовки инструмента)	
Потребляемая мощность установок	20–40 кВт	15–60 кВт
Масса	2000 кг	2000–3000 кг

Ограничение широкого использования методов PVD и CVD на отечественных предприятиях связано с применением сложного и дорогостоящего оборудования, требующего высокой квалификации обслуживания. Для российского менталитета промышленных предприятий наиболее рационально для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий использовать малогабаритное, безвакуумное, недорогое и простое в обслуживании оборудование, похожее на известные и широко применяемые сварочные установки.

В соответствии с этой концепцией разработана технология бескамерного химического осаждения тонкопленочных покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (PECVD by cold atmospheric plasma) [3], объединяющая положительные эффекты процессов MO-CVD и PE-CVD. При этом дополнительно ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температур нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и применении гибко управляемой электродуговой плазмы. В связи с тем что тонкопленочные износостойкие покрытия наносят на изделия на заключительной стадии их изготовления или непосредственно перед их использованием, данный процесс назван финишным плазменным упрочнением (ФПУ). С применением этой технологии возможно нанесение различных упрочняющих покрытий как на покупной инструмент, так и на самостоятельно изготавливаемый и перетачиваемый инструмент.

В качестве источника тепловой энергии для нанесения износостойкого покрытия при ФПУ используется плазменная струя, истекающая при атмосферном давлении из малогабаритного дугового плазмотрона, дополненного плазмохимическим реактором (рис. 2).

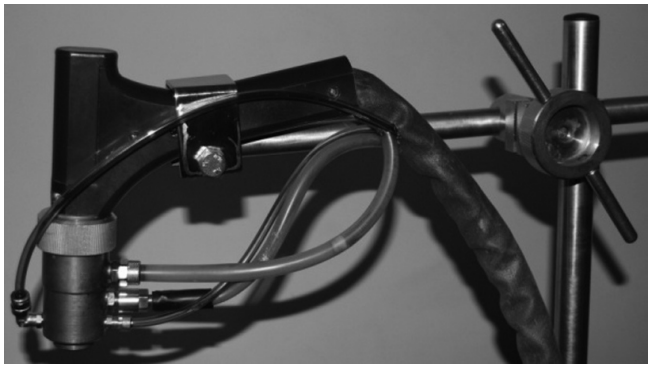


Рис. 2. Плазмотрон с плазмохимическим реактором

К основным достоинствам ФПУ относятся: возможность осуществления процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 200 °С; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритных размеров; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Главным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия, например, на основе системы Si—O—C—N, является разложение паров жидких элементоорганических препаратов, пары которых вводятся в плазмохимический реактор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии. Нанесение покрытия осуществляется локально на упрочняемую поверхность изделия при циклическом сканировании плазменной струи, которая касается обрабатываемой зоны. Важной особенностью ФПУ является также то, что покрытие можно наносить многослойно при толщине каждого слоя 2–20 нм полосами шириной 8–15 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). В целях минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменную струю перемещают со скоростью 3–150 мм/с.

Физико-механические и трибологические характеристики тонкопленочных покрытий

В целях повышения долговечности сверл, изготавливаемых из быстрорежущих сталей, наибольшее применение в качестве упрочняющих находят покрытия из TiN и TiAlN, осаждаемые с использованием PVD-процессов [4, 5].

Проведем анализ физико-механических и трибологических свойств данных покрытий, а также нанокомпозитного покрытия системы Si—O—C—N, наносимого методом финишного плазменного упрочнения. Покрытия TiN и TiAlN наносили на модернизированной установке ННВ-6,6-И1 с дополнительной сепарацией плазменного потока, нанокомпозитное покрытие системы Si—O—C—N — на установке финишного плазменного упрочнения ТЕСИС-115. В качестве образцов использовались диски диаметром 15 и 30 мм, толщиной 5 мм, изготовленные из стали Р18, прошедшей термическую обработку до твердости 60–62 HRC.

Для определения физико-механических свойств в соответствии с ISO 14577-4:2007 применялся метод наноиндентирования, который состоит в приложении с программируемой скоростью ультрамалых сил (от 100 до 1000 мкН) к индентору с последующей его разгрузкой также с заданной скоростью и одновременным измерением с высокой точностью перемещения индентора. Получаемая в результате наноиндентирования кривая нагружения (или *P*—*h*-диаграмма) представляет собой нагрузочную и разгрузочную ветви (рис. 3).

Кривая нагружения характеризует сопротивление материала внедрению жесткого индентора и отражает как упругие, так и пластические свойства исследуемого материала. Разгрузочная кривая определяется главным

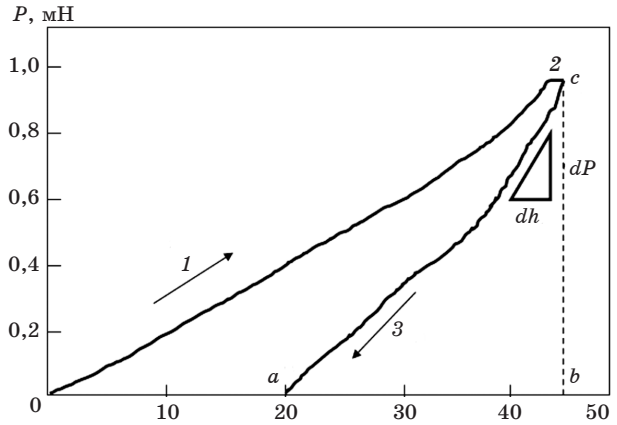


Рис. 3. Диаграмма нагружения индентора *P*—*h*:
1 — участок нагружения; *2* — участок выдержки при максимальной нагрузке; *3* — участок разгрузки индентора

образом упругим восстановлением отпечатка индентора. Обработка таких P—h-диаграмм в рамках соответствующих моделей, производимая с использованием метода Оливера и Фарра [2], позволяет определить численное значение нанотвердости H_p, приведенного модуля упругости $E^* = E/(1 - \nu^2)$, где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона, и упругого восстановления $W_e = h_m - h_r/h_m$, где h_m — наибольшая глубина погружения индентора; h_r — глубина проникновения индентора после снятия нагрузки.

Важно отметить, что значение нанотвердости существенно отличается от микротвердости, которая измеряется после снятия нагрузки с учетом восстановленного отпечатка, что всегда приводит к изменению его размеров из-за наличия упругих напряжений.

Для повышения стойкости к упругой деформации разрушения и уменьшения пластической деформации материал поверхностного слоя должен обладать высокой твердостью при низком модуле упругости. Высокая твердость материала гарантирует устойчивость к царапинам и абразивному износу, а низкий модуль упругости обеспечивает высокую устойчивость к пластической деформации и позволяет заданной нагрузке распределяться в пределах более широкой области [2]. Для количественной сравнительной оценки стойкости материала покрытия к упругой деформации разрушения используется отношение нанотвердости к эффективному модулю упругости H_p/E^*, называемое также индексом пластичности покрытия, а для оценки сопротивления пластической деформации применяется параметр $H_p{}^3/E^{*2}$. В качестве параметра, характеризующего прочность поверхностного слоя, связанного с упругим восстановлением свойств при наноиндентировании, используется параметр упругого восстановления W_e.

Таким образом, выбор оптимального упрочняющего покрытия по параметрам наноиндентирования может быть произведен на основании определения вышеназванных критериев и их сравнения. При этом более износостойким является покрытие с большими значениями критериев H_p/E^*, H_p^3/E^{*2} и параметра W_e. Кроме этого, для минимизации упругих напряжений на границе раздела покрытие—подложка и внутренних остаточных напряжений в системе необходимо стремиться к получению близких значений модулей упругости основы и покрытия. Эти принципы могут быть также использованы и при оптимизации технологического процесса и выборе режимов нанесения упрочняющих покрытий.

Физико-механические свойства исследуемых покрытий измеряли нанотвердомером TI750Ubi (Hysitron, США). При измерении нанотвердости учитывалось, что максимальная глубина индентирования не должна превышать 10 % от толщины исследуемого покрытия (для исключения влияния подложки), а индентирование при малой глубине может приводить к повышенной погрешности. Для исследуемых тонкопленочных покрытий (многослойных и сложного строения) измерения осуществлялись при разных нагрузках для определения более объективных параметров измерения. Скорость приложения нагрузки постоянная — 100 мкН/с. Тип наноиндентора — индентор Берковича. Интервал нагрузок от 100 до 1000 мкН. Шероховатость в зоне индентирования не более 25 нм. Перед началом серии испытаний проводилась калибровка прибора на эталонных образцах с известными модулем упругости и твердостью. В качестве эталонных образцов использовали монокристалл Si (100) и сапфир. Для каждого образца — твердость испытывали в 5 разных местах поверхности образца (расстояние между ними 100 мкм). Таким образом, значения H_p и E^* каждого образца представляют собой среднее значение, полученное от пяти отпечатков. Результаты измерений обрабатывали по методам Оливера и Фара.

Результаты измерения физико-механических свойств рассматриваемых материалов покрытий и расчетные значения критериев H_p/E^*, H_p^3/E^{*2} для разных усилий нагрузки приведены в табл. 2, где H_p, ГПа — нанотвердость; $E^* = E/(1 - \nu^2)$ ГПа — приведенный модуль упругости (E — модуль Юнга, $\nu = 0{,}25$ — коэффициент Пуассона); H/E^* — стойкость покрытия к упругой деформации разрушения (индекс пластичности); H^3/E^{*2} — сопротивление пластической деформации; We, % — доля работы упругой деформации (упругое восстановление).

В соответствии с полученными значениями покрытие системы Si—O—C—N имеет при-

Таблица 2

Физико-механические свойства покрытий

Покрытие	H_p, ГПа	E^*, ГПа	H_p/E^*	H_p^3/E^{*2}	W_e, %
TiN	22	300	0,07	0,12	87
	24	320	0,08	0,14	81
	25	340	0,07	0,14	90
TiAlN	25	293	0,09	0,19	99
	37	383	0,10	0,36	85
	38	336	0,11	0,50	77
Si—O—C—N	19	127	0,14	0,41	89
	19	128	0,15	0,44	93
	20	123	0,16	0,54	82
	17	112	0,15	0,41	76

мерно в 1,5–2,0 раза более высокую стойкость к упругой деформации разрушения (критерий H_p/E^*), в 1,2–3,0 раза более высокое сопротивление пластической деформации (критерий H_p^3/E^{*2}) по сравнению с покрытиями TiN и TiAlN и более близкий модуль упругости к модулю упругости материала подложки – стали Р18 (200–220 ГПа), характеризующий минимизацию упругих напряжений на границе раздела покрытие—подложка и внутренних остаточных напряжений в системе.

На рис. 4 приведен пример полученной диаграммы нагружения для покрытия Si—O—C—N.

Трибологические испытания покрытий и материала основы — стали Р18 проводились с использованием трибометра TRB-S-DE (CSM, Швейцария) по схеме «ball-on-disk» («шарик-диск») в соответствии с международными стандартами ASTM G99-959, DIN50324, ISO 20808 и контртела (шарика диаметром 3 мм), изготовленного из нитрида кремния (Si_3N_4). При каждом испытании использовался новый шарик, а его износ при оценке диаметра образующейся лунки не превышал 0,1–0,2 мкм. Нагрузка на контртело составляла 5 Н. Линейная скорость — 10 см/с. Путь трения — 80 м. При испытаниях использовалось моторное масло Nissan SAE5 W40. Ширина следа износа после трибоиспытаний определялась с использованием инвертированного металлургического микроскопа Olympus GX 51.

Результаты трибологических испытаний представлены в табл. 3. В качестве примера на рис. 5 приведены протокол испытаний покрытия Si—O—C—N с графиками изменения во времени коэффициента трения и глубины заглубления индентора в материал покрытия,

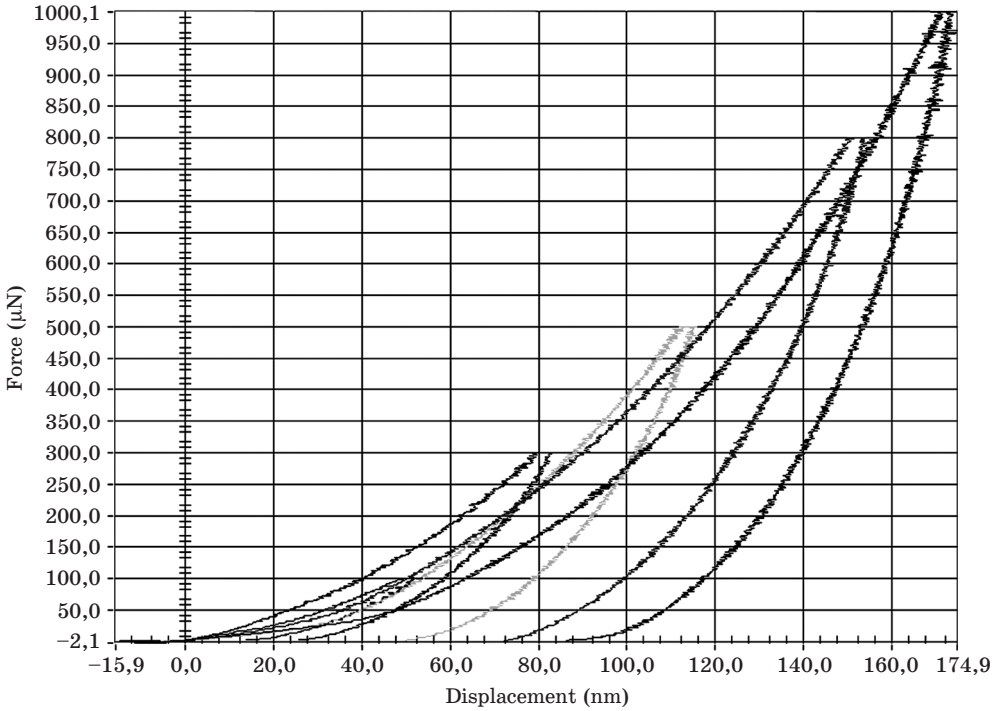


Рис. 4. Кривые нагружения при определении физико-механических свойств покрытия Si—O—C—N (при нагрузках 300, 500, 800 и 1000 мкН)

Таблица 3

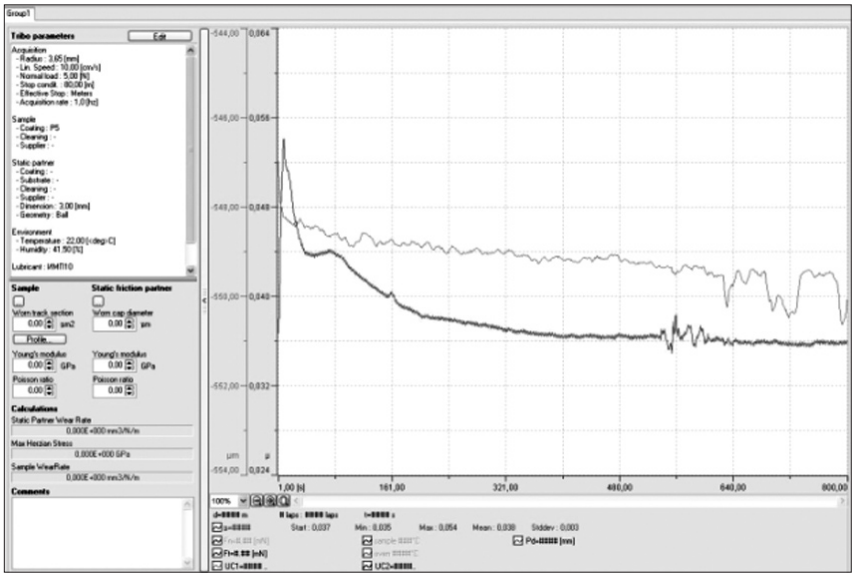
Значения параметров трибологических испытаний на трибометре TRB-S-DE

Покрытие	Основа (диаметр, мм)	Средний коэффициент трения	Износ, мкм	
			по глубине	по ширине следа
—	Р18 (30)	0,2	6,7	617
TiN	Р18 (30)	0,1	3,0	90,3
TiAlN	Р18 (30)	0,2	5,0	75,3
Si—O—C—N	Р18 (30)	0,04	2,0	99,8

а также полоса износа с замерами ее ширины на образце с покрытием.

Сравнительный анализ покрытий между собой показал, что минимальным коэффициентом трения обладает покрытие системы Si—O—C—N и он более чем в 2,5 раза меньше коэффициента трения ближайшего покрытия TiN и в 5 раз меньше материала основы. Наличие резких амплитудных изменений глубины износа может определяться образующимися продуктами износа, влияющими непосредственно на процесс трения.

а)



б)

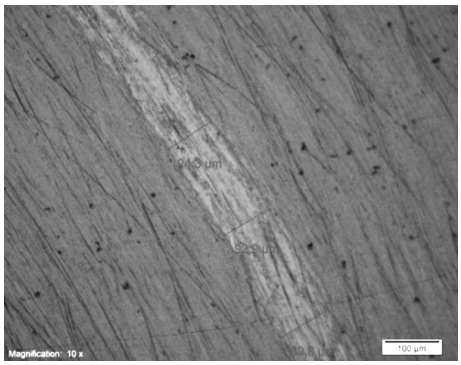


Рис. 5. Протокол испытания на трение и износ (*а*) и полоса износа покрытия Si—O—C—N (*б*)

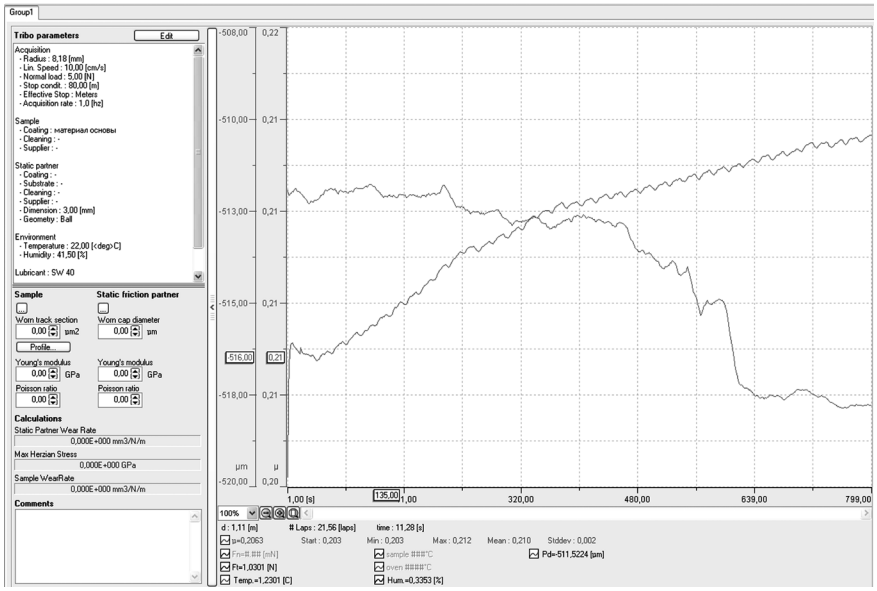


Рис. 6. Протокол испытания на трение и износ материала основы — стали Р18 (без покрытия) со смазкой SAE5 W40

Отсутствие трибологического покрытия на материале основы — стали Р18 — кардинально изменяет параметры трения и износа — кривая изменения коэффициента трения со временем имеет возрастающий характер, максимальные глубину и ширину износа (рис. 6).

Расчет параметров процесса нанесения покрытия на сверла

Нанесение покрытия системы Si—O—C—N на сверла диаметром менее 10 мм возможно при их групповой обработке с расположением упрочняемых изделий по окружности в специализированной оснастке на диаметре планшайбы D (рис. 7). Поворот изделий вокруг собственной оси может быть периодический с учетом необходимого обеспечения воздействия плазмы на все стороны упрочняемых поверхностей (например, с шагом на 180° при диаметре изделий менее 6 мм) или с постоянным вращением вокруг собственной оси, но с учетом того, чтобы относительное перемещение обрабатываемой поверхности и плазменной струи не превышало 150 мм/с, что обусловлено газодинамическими процессами взаимодействия обрабатываемой поверхности и плазменной струи.

Для исключения перегрева обрабатываемых изделий рекомендуется назначать окружную скорость планшайбы 30–40 мм/с. При расчете задаются: длина упрочняемой цилиндрической части изделий X, мм; диаметр планшайбы D, мм; осевая скорость вдоль оси изделия v_x, мм/с (при шаговом смещении плазменной струи вдоль оси изделия на 8 мм

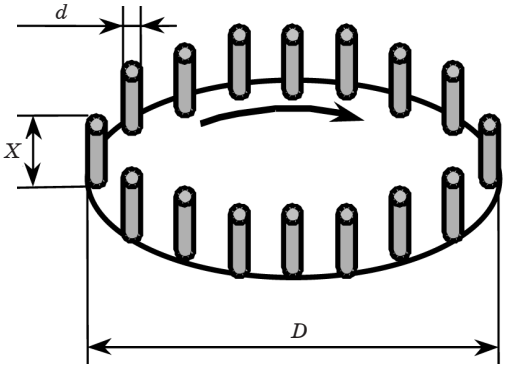


Рис. 7. Расположение сверл на специализированной оснастке

Таблица 4

Групповая обработка цилиндрического инструмента на планшайбе диаметром 1000 мм методом ФПУ путем нанесения покрытия толщиной 150 нм

Диаметр изделий d, мм	Число установленных изделий $И$	Вращение изделий	Число плазменных модулей	Производительность обработки $П_{обр}$, изд./ч
10	260	Постоянное	1	68
			4	272
6	390		1	102
			4	408
		Периодическое на 180 °С	1	160
			4	640

$v_x = 0$); толщина покрытия F, мкм; окружная скорость v планшайбы на диаметре D, мм/с.

Повышение производительности групповой обработки при массовом производстве может быть достигнуто использованием не одного, а нескольких плазменных модулей.

В табл. 4 приведены примеры групповой обработки инструмента диаметром 10 и 6 мм с длиной упрочняемой рабочей части 32 мм. Из табл. 4 видно, что производительность нанесения покрытия для изделий диаметром 10 мм может достигать 272 изделия в час при постоянном вращении изделий и при использовании четыре плазменных модулей, а для изделий диаметром 6 мм может достигать 640 изделий в час при периодическом повороте изделий на 180° и при использовании 4 плазменных модулей.

Таким образом, автоматизация технологии нанесения покрытия методом ФПУ с использованием соответствующего механического оборудования при массовом производстве дает возможность повысить производительность по сравнению, например, с PVD-процессами.

Модельные и промышленные испытания сверл после финишного плазменного упрочнения

Модельные испытания сверл из различных материалов и покрытий проводились на кафедре конструкционных материалов и материаловедения СПбГПУ под руководством проф. М. Т. Коротких. Объекты испытания —

Таблица 5

Материал сверла	Стойкость (количество отверстий)
Порошковая быстрорежущая сталь Р6М5Ф3-МП (Vanadis-23)	4
Порошковая быстрорежущая сталь Р6М5Ф3-МП (Vanadis-23) с покрытием Si—O—C—N	12
HSS-PM с покрытием TiAIN Garant (114620 6)	2
HSS-Co с покрытием TiAIN Garant (114600 6)	6
N HSS с покрытием TiN Holex(114360 6)	7
Р6М5	0

спиральные сверла диаметром 6 мм из порошковой быстрорежущей стали Р6М5Ф3-МП (Vanadis-23), стандартной стали Р6М5, стали HSS-PM с покрытием TiAIN Garant (114620 6), стали HSS-Co с покрытием TiAIN Garant (114600 6), стали N HSS с покрытием TiN Holex (114360 6), а также сверла из порошковой быстрорежущей стали Р6М5Ф3-МП (Vanadis-23) с износостойким покрытием системы Si—O—C—N, наносимых методом финишного плазменного упрочнения.

В качестве обрабатываемого материала применялась пластина, изготовленная из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т толщиной 15 мм. Режим резания — отверстия сквозные, скорость резания 18,8 м/мин, подача 0,05 мм/об, охлаждение — 10 %-ным раствором водного эмульсола KUTWELL 42, при подаче в зону резания свободным поливом. В качестве критерия износа выбрано достижение фаски износа на периферии режущей кромки сверла, равной 0,4 мм. Стойкость сверл определяли количеством обработанных отверстий до достижения предельного износа.

Результаты испытаний сверл из различных материалов и покрытий приведены в табл. 5.

На основании данных модельных испытаний выявлено, что наиболее высокой стойкостью обладают сверла из порошковой быстрорежущей стали Р6М5Ф3-МП (Vanadis-23) с покрытием системы Si—O—C—N. При данных условиях испытаний они в 3 раза более долговечны по сравнению со сверлами из аналогичного материала, но без данного покрытия и в 2–6 раз имеют более высокую стойкость, чем покрытия из TiN и TiAlN.

Промышленные испытания сверл из порошковой быстрорежущей стали Р6М5К5-МП с покрытием системы Si—O—C—N проводились на ОАО «Пермский завод «Машиностроитель» на роботизированном технологическом комплексе на базе робота KUKA KR60HA при перфорации заготовки — звукопоглощающей сэндвичевой конструкции авиационного двигателя 94-05-8006 (материал — стеклопластик ВПС-33). Сверление полимерных композиционных материалов (стеклопластиков, углепластиков) обычно связано с образованием большого количества сколов, разлохмачиванием материала, со сложностью получения необходимой шероховатости поверхности, с плохим отводом теплоты из зоны резания, абразивным воздействием наполнителя материала, деструкции полимерного связующего, низкой производительностью и другими факторами [5].

При проведении испытаний стойкости сверл за критерий затупления принимался технологический фактор — появление первых признаков нарушения нормальной работы и требующей замены инструмента из-за резкого падения качества обработанных отверстий: появления вырывов, разлохмачивания материала вокруг отверстия, а также возникновения ощутимых колебаний заготовки. Стойкость сверл определялись количеством обработанных отверстий. Результаты промышленных испытаний приведены в табл. 6.

Таблица 6

Сверло	Материал режущей части	Подача, мм/мин	Частота вращения, об/мин	Количество обработанных отверстий, шт.
Спиральное ∅ 2 мм, фирмы IZAR (Испания)	Быстрорежущая сталь HSSCO с покрытием TiN	4	12 000	3000
Спиральное ∅ 2 мм	Порошковая быстрорежущая сталь Р6М5К5-МП с покрытием Si—O—C—N	4	12 000	5500

Таблица 7

Производственные испытания сверл из стали Р6М5

Диаметр сверла, мм	Материал обрабатываемой заготовки	Относительное повышение стойкости	Организация, проводившая испытания
2,1	30ХГСА	3,0	Электромашиностроительный завод «Лепсе», Киров
3,0	ВЧ 70	5,75	Моторостроительный завод, Харьков
3,0	Стеклотекстолит	3,5	«Мотор Сич», Запорожье
4,0	65Г	2,0	Снежнянский машиностроительный завод «Мотор Сич», Снежное
4,2	12ХН3А	5,0	Завод технологической оснастки, Николаев
5	АК7	13,6	«Топливные системы», Санкт-Петербург
8,9	Ст45	4,0	Турбомеханический завод, Полтава
23	Ст45	2,5	Инструментальный завод «Уралвагонзавод», Нижний Тагил

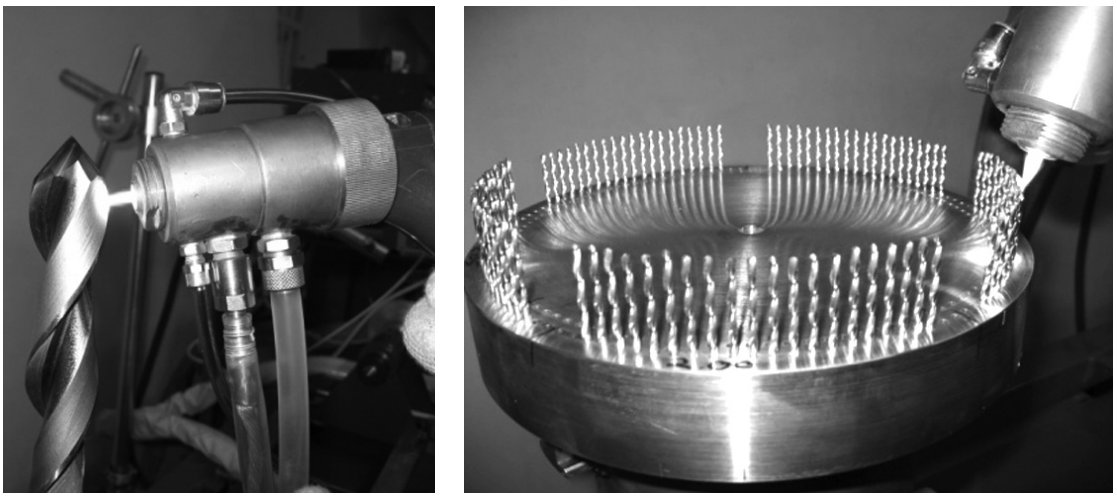


Рис. 8. Нанесение износостойкого покрытия системы Si—O—C—N методом финишного плазменного упрочнения

На основании проведенных промышленных испытаний сверла с покрытием Si—O—C—N имели в 2 раза более высокую стойкость, чем серийно используемые на производстве сверла фирмы IZAR Cutting Tools S. A. L. (Испания) с покрытием нитрида титана.

На рис. 8 показан процесс нанесения покрытия системы Si-O-C-N методом финишного плазменного упрочнения на сверла, а в табл. 7 — результаты его промышленного внедрения.

Выводы

На основании сравнительного анализа физико-механических и трибологических свойств различных покрытий для упрочнения сверл, модельных и промышленных испытаний технология финишного плазменного упрочнения путем нанесения композитного нанопокрытия системы Si—O—C—N может рассматриваться как перспективная для широкомасштабного внедрения на предприятиях крупного, среднего и малого бизнеса как при массовом выпуске инструмента, так и при использовании покупного и изготавливаемого собственными силами специализированного инструмента.

Литература

1. **Тополянский П. А.** Сравнительные характеристики электроплазменных процессов нанесения износостойких покрытий и изменения свойств поверхности. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента

и технологической оснастки // Материалы 9-й практ. конф. 10-13.04.2007, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2007. Ч. 2. С. 243–247.

2. **Handbook** of Thin Film Materials. Vol.1: Deposition and Processing of Thin Films/Ed. By H. S. Nalwa. Marcell Dekker Inc., N.Y., USA, 2002.

3. **Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А.** Плазменные технологии: руководство для инженеров. СПб.: СПбГПУ, 2008. 406 с.

4. **Гиршов В. Л., Тополянский П. А.** Металлорежущий инструмент из порошковой стали с дисперсной структурой и алмазоподобным нанопокрытием. Металлообработка. 2009. № 1 (49). 2009. С. 43–49.

5. **Гиршов В. Л, Коротких М. Т., Крупнова И. В., Коробейников Н. В.** Высокоэффективный инструмент из порошковых быстрорежущих сталей с дисперсной структурой // Металлообработка. 2011. № 4. С. 43–47.

6. **Дударев А. С.** Конструкции сверл и фрез для алмазно-абразивной обработки стеклопластиков и углепластиков // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 1. С. 361–370.

Наукоемкие технологии машиностроительного производства: Физико-химические методы и технологии — Учеб. пособие для вузов / Под ред. Б. П. Саушкина. — М.: Издательство ФОРУМ, 2013. — 928 с.

В книге представлены основы теории и практическое применение технологий машиностроительного производства, основанных на наукоемких физико-химических методах формообразования.

Обсуждается понятийный аппарат технологии, построена развернутая классификация методов и способов обработки материалов, применен системный подход к анализу различных технологических объектов. С единых методологических позиций рассматриваются технологические проблемы и перспективы развития таких видов обработки материалов, как электроэрозионная, электрохимическая, химическая, лазерная, электронно-лучевая, плазменная, фрикционная, ультразвуковая, водоструйная, гидроабразивная. Рассмотрены технологии, основанные на комбинированных методах воздействия на материал. Кроме технологий размерной обработки описано применение различных физико-химических методов для модификации поверхностного слоя деталей машин.

Приведены примеры успешного применения соответствующих технологий в машиностроительном производстве, обобщены справочно-нормативные и учебно-методические материалы, необходимые для технологического проектирования. Рассмотрены экологические проблемы, связанные с развернутым промышленным применением физико-химических методов обработки материалов.

Книга предназначена студентам старших курсов и аспирантам машиностроительных специальностей высших учебных заведений, научным работникам, инженерам-технологам и инженерам-конструкторам, занятым в области создания и внедрения новой техники и новых технологий.

По вопросам приобретения книги обращаться в Межбиблиотечный коллектор (г. Москва) или по адресу: sbp47@ mail.ru

Abstract

Vasilkov D. V., Kochina T. B. *Modelling of contact interactions taking into account the rheology in the cutting zone at high-speed processing of products from heat resisting alloys*

The dynamic model of technological system is offered at the high-speed machining, constructed on the basis of rheological representation of contact interactions in a cutting zone. Identification of parameters of model for the solution of a task is executed by a method of piecewise and linear approximation.

Key words: modelling, dynamics, high-speed cutting, friction.

Kizhnyaev Yu. I., Nemtsev B. A., Yakovlev P. D. *Design and application of technology for processing deep holes in the «Housing» parts from titanium alloy*

The following main deep boring operation design tasks were considered for processing of deep holes in special housings from titanium alloy: blank mounting scheme development, definition of conditions for transportable chips production and selection of optimal cutting modes. Specified mathematical models are based on theoretical and experimental research of ∅30–60 mm holes deep boring processes. The work results were confirmed in practice during processing of 2 lots of the «housing» blanks.

Key words: titanium alloy, deep through boring, technology design.

Kiseleva E. V. *The role of surface phenomena in metal cutting using superfine emulsions*

Experimentally proved that the use of fine emulsions significantly improves their tribological characteristics on the blade of metal cutting operations.

Key words: cooking oil-water emulsion, dispersion, surface energy, interfacial surface, tool wear.

Samarkin A. I., Negina O. V. *Improving the accuracy of treatment at edm wire cutting*

The article is devoted to the discussion of issues related to the effect of pumping dielectric fluid on form unprofiled wire electrodes, and thus the accuracy of EDM wire cutting. The possibility of increasing the accuracy of processing by the compensation process by correcting the errors of the control program the machine.

Key words: EDM wire cutting, electrode wire, pumping a liquid, dielectric, numerical simulation, diagrams.

Topoljanskii P. A., Ermakov S. A., Sosnin N. A., Topoljanskii A. P. *Comparative analysis of wear-resistant coatings properties on drilling tools hardening*

Modern technologies of thin-film wear-resistant coatings: CVD- and PVD-processes have been examined, as well as the new finishing plasma hardening technology (FPH). This method relates to the processes of beadless chemical coatings deposition of thin-film coating, carried out at atmospheric pressure with the use of liquid organoelemental compounds and gaseous atmosphere and with PECVD by cold atmospheric plasma. Comparative physical/mechanical and tribological characteristics of different wear-resistant coatings are given, and the results of model and industrial tests of finishing plasma hardening technology applied to powdered metal high-speed steel drills hardening are reported.

Key words: modification, PVD, CVD, PECVD by cold atmospheric plasma, finish plasma strengthening, wear-resistant nanocoating, tribological tests.

Kulikov M. Y., Inozemcev V. E., Nechaev D. A., Naing Oo Myo. *The influence of electrical activation on the surface quality during finishing plastic materials*

Current trends in the engineering aimed at improving the quality finishing of parts, especially parts of friction and other components operating in complex environments with dynamic loads. In this connection there is the need for high quality processing surface in silumin and cermets which are difficult to machine materials. For this purpose the use of electrical activation of the cutting process fluid used in the machining process. Electrical activation contribute to the achievement of the required quality parameters of the surface. Thus, the processing required cermets achieved porosity and surface roughness, while silumin processing can significantly reduce the roughness.

Key words: cermet, silumin, roughness, porosity, electrical activation, mechanical engineering, machining, quality settings.

Sokolv Yu. A. *The features of modeling of process of layerwise synthesis of products with the help of an electronic beam*

WIn this study the questions of modeling of process of synthesis of products are considered by an electronic beam. The features are marked out at the process description. The models of a scanning electron beam and models of mass carry and heat transmission are put in a basis of research.

Key words: mathematical modeling, synthesis of products, electron beam, mass carry, heat transmission.

Контакты с авторами

Васильков Дмитрий Витальевич — д-р техн. наук, зав. кафедрой, ГОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет “Военмех” им. Д. Ф. Устинова», кафедра «Металлорежущие станки и инструменты». 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: (812) 251-39-75, e-mail: vasilkovdv@yandex.ru

Буриличев А. Е. — руководитель направления кузнечно-прессового оборудования ООО «Вебер Комеханикс». 109202, Москва, ул. Фрезерная, д. 2/1, стр. 10; тел.: +7 (495) 925-88-87, e-mail: weber@weber.ru

Ермаков Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»; техн. директор НПФ «Плазмацентр». 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68, оф. 103; тел.: (812) 444-93-36, e-mail: conf@plasmacentre.ru

Иноземцев Виталий Евгеньевич — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; тел.: 8-909-621-75-02, e-mail: vitalin-85@mail.ru

Кижняев Юрий Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения, обработка глубоких отверстий» Балтийского государственного технического университета (БГТУ) «Военмех» им. Д. Ф. Устинова; тел. 495-77-49, e-mail: bgty-E2 @ yandex.ru

Киселева Елена Валерьевна — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина»; тел.: 8 (4932) 26-97-73, 8 (4932) 38-57-01, факс 8 (4932) 38-57-01, e-mail Kiseleva0505@gmail.com

Кочина Татьяна Борисовна — канд. техн. наук, доцент филиала Тюменского государственного нефтегазового университета г. Нижневартовска; e-mail: tbkochina50@mail.ru

Куликов Михаил Юрьевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; тел.: 8-964-578-56-89, e-mail: muk.56@mail.ru

Мо Наинг У — аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; тел.: 8-965-119-59-12, e-mail: myonaingoo27@mail.ru

Негина Оксана Витальевна — ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения Псковского государственного университета. Псков, ул. Л. Толстого, д. 4, тел.: (8112) 79-78-36, e-mail: Oxana_neg@mail.ru

Немцев Борис Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения, обработка глубоких отверстий» Балтийского государственного технического университета (БГТУ) «Военмех» им. Д. Ф. Устинова; тел. 495-77-49, e-mail: nemtsev1505@yandex.ru

Нечаев Дмитрий Александрович — преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ). 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; тел.: 8-903-149-82-93, e-mail: dimon130784@mail.ru

Самаркин Александр Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения Псковского государственного университета. Псков, ул. Л. Толстого, д. 4; тел.: (8112)79-78-36, e-mail: Alex_Samarkin@mail.ru

Соснин Николай Алексеевич — д-р техн. наук, профессор ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»; зам. ген. директора по науке НПФ «Плазмацентр». 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68, оф. 103; тел.: (812) 444-93-36, e-mail: conf@plasmacentre.ru

Соколов Юрий Алексеевич — гл. конструктор НТК «Электромеханика»; тел.: 8-910-939-17-56, e-mail: s5577@inbox.ru, sklvfi@inbox.ru

Тополянский Андрей Павлович — аспирант ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»; зам. ген. директора, инженер НПФ «Плазмацентр». 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68, оф. 103; тел.: (812) 444-93-37, e-mail: conf@plasmacentre.ru

Тополянский Павел Абрамович — канд. техн. наук, доцент ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»; ген. директор НПФ «Плазмацентр». 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68, оф. 103; тел.: (812) 528-74-84, e-mail: conf@plasmacentre.ru

Яковлев Павел Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения, обработка глубоких отверстий» Балтийского государственного технического университета (БГТУ) «Военмех» им. Д. Ф. Устинова; тел. 495-77-49, e-mail: bgty-E2@yandex.ru