

Улучшение качества поверхности тонкостенных оболочек применением функциональных водорастворимых покрытий, содержащих фрактальные нанокластеры

Г.И. Шульга

Ростовское региональное отделение
МОО «Академия проблем качества»

Одна из новых тенденций развития современного машиностроения в области обработки материалов – создание функциональных (адаптирующихся) водорастворимых технологических смазочных средств (ВТСС), обеспечивающих увеличение долговечности инструмента, технологического оборудования и оснастки, улучшающих качество обрабатываемых поверхностей. Разработка таких материалов стала возможной вследствие развития нанотрибологии, инженерии поверхности, синергетики, изучающей процессы устойчивости и распада диссипативных структур различной природы, в том числе солитонов, фононов, формирования новой парадигмы управления свойствами материалов, изменением их фрактальной структурой на наноуровне, инженерной экологии, микробиологии и др.

Создание функциональных ВТСС при обработке материалов основывается на идеях фрактального материаловедения, базирующегося на принципах синергетики и теории фрактальной геометрии. Свойства таких материалов связывают с динамической структурой, самоорганизующейся в точках бифуркаций. Динамика трансформации старой структуры, потерявшей устойчивость, вновь контролируется принципами синергетики, основным из которых является принцип минимума производства энтропии. Система в состоянии неравновесности способна к выбору оптимальной структуры, необходимой для дальнейшего функционирования системы как целого.

Основоположником синергетики как теории, связанной с изучением процессов в сложных системах, далеких от равновесия, Г. Хакеном выделена триада, контролирующая процессы самоорганизации: нелинейность – когерентность – открытость [1]. Введенное Б.Б. Мандельбротом понятие фрактальной геометрии [2] и установленные связи фракталь-

ности с теорией нелинейных отображений являются объективным отражением принципов синергетики. Фракталы («fractional» – дробный) являются объектами, которые при наблюдении при различных увеличениях повторяют одну и ту же (самоподобную) форму. Фракталы, кроме свойства самоподобия, обладают свойствами универсальности, заключающимися в их инвариантности к природе объекта. Фрактальную размерность используют как единую количественную меру разупорядоченности структур различной природы. Фрактальное материаловедение связывают с созданием материалов с заданными свойствами путем управления фрактальной структурой, возникающей в условиях нелинейной динамики. Фрактальные структуры обладают всеми свойствами биологических материалов [3], так как они инвариантны к анализируемому объекту, обладают свойствами адаптации к внешнему воздействию, способны к самоуправлению путем перестройки структуры в критических точках.

Концепция разработки функциональных ВТСС основывается на следующих положениях [4–8]: создание нанокластеров с фрактальной структурой из компонентов с высоким уровнем неравновесности, формирование фрактальных гетерогенных структур в объеме материала, слоистых (ламеллярных) в зоне контакта трибосопряжений, обеспечивающих долговечность инструмента, оснастки, оборудования, улучшение качества обрабатываемых поверхностей, встраивание компонентов ВТСС в пищевые цепи экосистем. ВТСС рассматривается не как вещество с заданным химическим составом, обеспечивающее при обработке материалов самоорганизацию диссипативных структур (ДС) с заданным комплексом свойств, а как интегральное понятие, объединяющее в себе вещество, технологию его изготовления, применение в технологическом оборудовании, встраивание в пищевые цепи экосистем, утилизацию и возможность вторичного применения.

Технологические процессы при обработке материалов рассмотрены как трибообъекты, а пары трения (штамповый, давящий, режущий, алмазно-абразивный инструмент – обрабатываемое изде-



лие) – смазывание технологическими смазочными средствами (ТСС) – окружающая среда как трибосистемы. В зависимости от применяемых ТСС могут быть реализованы различные схемы технологий.

Схемы технологий, применяемых в современном машиностроении, приведенные на рис. 1а, являются дискретными, так как в каждом технологическом процессе используют свои ТСС [9–11]. При обработке материалов давлением используют технологические смазочные материалы (ТСМ) для лезвийной – СОТС₁ (смазочно-охлаждающее технологическое средство), алмазно-абразивной: шлифования – СОТС₂, хонингования – СОТС₃, суперфиниширования – СОТС₄ и т.д. СОТС₁ может применяться также при шлифовании.

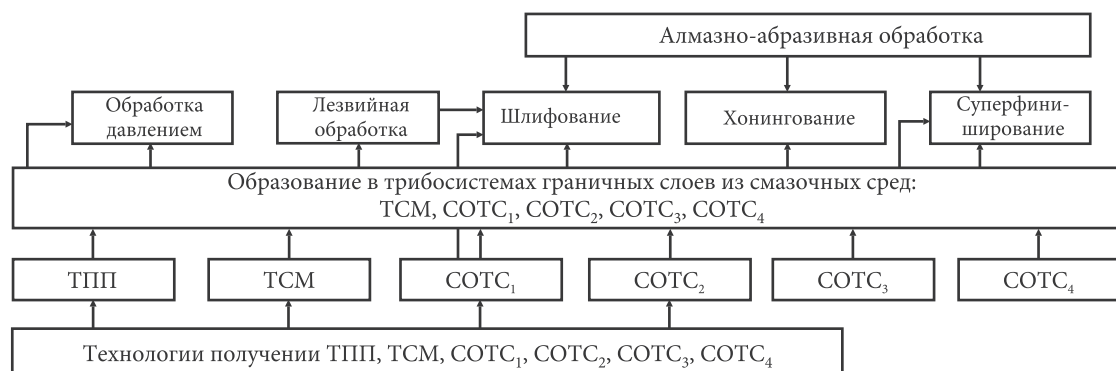
В тяжелых условиях штамповки, вытяжки, глубокой многопереходной вытяжки при получении тонкостенных оболочек применяют технологические подмазочные покрытия (ТПП) совместно с ТСМ или покрытиями. В зоне контакта «инструмент – обрабатываемое изделие» образуются граничные смазочные слои. Их смазочное действие улучшают присадками, различными добавками. Однако граничные смазочные слои не отвечают критериям функциональности, не являются неравновесными структурами, упорядоченными вдали от равновесия.

Схемы функциональных (адаптирующихся) технологий, приведенные на рис. 1б, имеют непрерывный

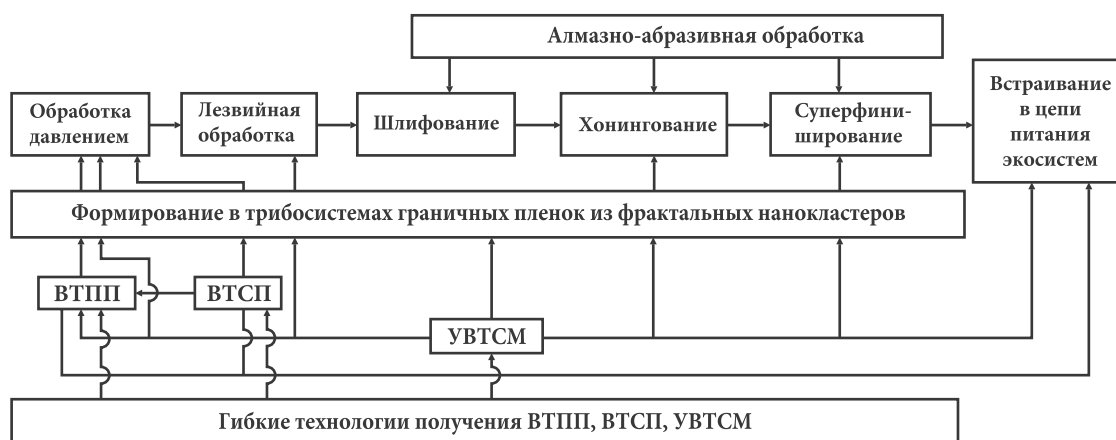
характер [4–8, 12, 13]. Функциональные технологии при обработке материалов давлением механической могут быть реализованы с использованием функциональных ВТСС: универсальных водорастворимых технологических смазочных материалов (УВТСМ), водорастворимых технологических подмазочных покрытий (ВТПП), водорастворимых технологических смазочных покрытий (ВТСП), топокомполитов (ТК) – двухслойных водорастворимых технологических подмазочных (ВТПП) и смазочных покрытий (ВТСП). Такие ВТСС изготавливают по гибким технологиям, обеспечивающим их применение индивидуально или совместно.

ВТСС содержат фрактальные кластеры и способны формировать в зоне контакта «инструмент – обрабатываемое изделие» самоорганизующиеся диссипативные структуры (ДС), облегчающие обработку материалов и снижающие изнашивание инструмента, оснастки, оборудования, улучшающих качество обрабатываемых поверхностей. Фрактальные кластеры обладают свойствами самоподобия, адаптации к внешним воздействиям.

Обработка материалов давлением, лезвийная, алмазно-абразивная могут осуществляться с использованием УВТСМ. При тяжелых условиях штамповки, глубокой вытяжки тонкостенных оболочек, когда УВТСМ не в полной мере удовлетворяют техноло-



а



б

Рис. 1. Схемы технологий при механической обработке с использованием технологических смазочных средств: а – дискретная; б – функциональная

гическим процессам, для устранения адгезионного взаимодействия между штамповым инструментом и обрабатываемым изделием используют ВТПП совместно с УВТСМ. В роботизированных комплексах применяют ВТСП совместно с ВТПП. При попадании ВТСС в почву и воду происходит встраивание их в пищевые цепи наземной и водной экосистем, не вызывая антропогенной нагрузки выше нулевой или временной «упругой» дегенерации [6].

В отличие от технологий, применяемых в промышленности, предлагаемые технологии отличаются гибкостью получения ВТСС. В своем составе ВТСС содержат фрактальные кластеры, способные формировать в зоне контакта «инструмент – обрабатываемое изделие» самоорганизующиеся ДС. При попадании ВТСС в почву и воду происходит растворение, встраивание их компонентов в пищевые цепи наземной и водной экосистем и последующая биодеградация.

Разработкановых технологий примеханической обработке включает следующие этапы: системный анализ трибосистем трибологических объектов, научное обоснование формирования диссипативных самоорганизующихся фрактальных нанокластеров ВТСС, возможности встраивания их в цепи экосистем, разработку гибких технологий получения ВТСС и непрерывных технологий использования, методик исследования, технологий повторного использования ВТСС и утилизации.

Осесимметричные тонкостенные оболочки с равномерной толщиной стенки из листовых сталей могут быть получены прямой и обратной многопереходной глубокой вытяжкой, реверсивной штамповкой-вытяжкой, фрикционно-реверсивной вытяжкой и другими способами. Вытяжка осесимметричных тонкостенных изделий из листовых коррозионностойких сталей представляет сложную задачу, так как последние обладают повышенной склонностью к адгезионному взаимодействию со штамповым инструментом [9–11].

Вследствие появления налипания частиц металла, задиоров, рисок, царапин и других дефектов снижается качество деформируемых изделий, а также стойкость штампового инструмента. Кроме того, при выполнении формообразующих операций не должно происходить разрушения заготовки, потери устойчивости, приводящей к искажению заданной формы детали, изменения толщины стенки заготовки.

При высоких коэффициентах предельной деформации листовой коррозионностойкой стали на ее поверхность из растворов электролитов наносят медные, цинковые покрытия [14]. Однако адгезия таких покрытий с поверхностью коррозионностойкой стали низкая и через одну – две операции их нужно снять, что представляет сложную задачу, а затем нанести заново.

Для устранения налипания на инструмент наносят металлические покрытия из расплавов солей. Путем обработки коррозионностойкой стали в солевых расплавах хлоридов получают медные и оловянные покрытия с высокой адгезией. В результате химической реакции на поверхности обрабатываемого металла выделяется восстановленный металл покрытия. За счет высокой температуры расплава 400...500 °С образуется металлическая связь между заготовкой и покрытием через переходный слой.

На поверхности коррозионностойких сталей наносят также оксидные покрытия при обработке листовых заготовок в расплавах нитрита натрия, едкого натрия при температуре 430...500 °С. Для улучшения штампуемости горячекатаной листовой коррозионностойкой стали, локализации деформаций при штамповке в тонком слое производят ее плакирование алюминием.

Для глубокой вытяжки коррозионностойких сталей в качестве подмазочных покрытий рекомендуют применять полимерные покрытия, содержащие органические растворители [10], в которых пленкообразователем является нитроцеллюлоза – НЦ-62, НЦ-134, а наполнителями – пигменты, перхлорвиниловый лак ХВ 5179 (ХВЛ-21) с добавкой трикрезилфосфата, растворенные в смеси летучих растворителей ацетона, бутилацетона, толуола.

Приведенные выше технологические покрытия обладают существенными недостатками. Они не в полной мере обеспечивают долговечность штампового инструмента, оснастки, оборудования, качество обработанных поверхностей. Для их нанесения и снятия требуются агрессивные, токсичные электролиты, растворители, оказывающие вредное воздействие на организм человека. Взрывоопасность возникает в случае попадания влаги при нанесении покрытий из расплавов солей, а пожаровзрывоопасность – при нанесении покрытий из органических растворителей. Утилизация отработанных электролитов, расплавов солей затруднительна, вследствие чего происходит загрязнение окружающей среды. Разработанные топокомпозиаты ТА-1 и ТБ-1 – двухслойные покрытия, состоящие из подмазочных ПВ-3 марок А и Б и смазочных ВСП-1 и ВСП-2 покрытий и содержащие фрактальные нанокластеры, лишены отмеченных недостатков.

При формообразовании осесимметричной оболочки при вытяжке с прижимом фланец заготовки подвергается действию сжимающих и растягивающих напряжений [9, 11]. Максимальные растягивающие напряжения, действующие на матрицу при вытягивании пуансоном заготовки, способствуют разрыхлению оксидных пленок на радиусе матрицы. При пластической деформации заготовок в данной зоне происходит сближение образовавшихся юве-



нильных поверхностей на расстояние действия межатомных сил и образование в зоне контакта активных дислокационных центров, интенсивное повышение концентрации вакансий и внедренных атомов.

В зонах активных дислокационных центров по вакансионному механизму происходит диффузия между контактирующими металлами с образованием металлических связей. При этом в энергетически выгодных соотношениях возможна достройка электронных уровней атомов схватываемых металлов.

В результате образования металлических связей и последующего их разрушения, главным образом, на радиусе матрицы при вытяжке осесимметричной заготовки с прижимом более твердая поверхность матрицы пропахивает канавки или царапает более мягкий металл деформируемой заготовки. Возможен также перенос некоторых частиц металла с деформируемой заготовки на твердую поверхность матрицы. Данными частицами производится дополнительное пропахивание и царапание поверхности деформируемой заготовки.

Для устранения адгезионного взаимодействия, вызывающего появление канавок пропахивания на штамповом инструменте и деформируемом изделии вследствие недостаточности нагрузочной способности граничных смазочных слоев ТСС, необходимо дополнительное применение подмазочных или смазочных покрытий, наносимых на деформируемое изделие.

При нанесении на деформируемую заготовку подмазочного полимерного и смазочного покрытий и проведении технологического процесса штамповки, вытяжки, глубокой вытяжки устраняется непосредственное контактирование штампового инструмента и деформируемого изделия, локализуются сдвиговые деформации в поверхностных слоях топокомпозигов, в результате чего повышается долговечность штампового инструмента, оснастки, оборудования и улучшается качество деформируемых изделий.

Разработанные топокомпозицы ТА-1 и ТБ-1, содержащие фрактальные нанокластеры, включают полимерные водорастворимые подмазочные покрытия ПВ-3 марки А и ПВ-3 марки Б и водорастворимые смазочные покрытия ВСП-1 и ВСП-2, которые наносят на подмазочные покрытия ПВ-3 марки А и ПВ-3 марки Б [7]. Физико-механические свойства покрытий ПВ-3 марки А и ПВ-3 марки Б на основе дисперсий водорастворимых полимеров приведены в *табл. 1*.

Дисперсии покрытий ПВ-3 марки А и ПВ-3 марки Б различаются по составу. Покрытие ПВ-3 марки А трудно растворяется в воде, но легко снимается в горячей воде в виде пленки после проведения технологических операций вытяжки. Покрытие ПВ-3 марки Б хорошо растворяется в горячей воде. Различные свойства покрытий марки ПВ-3 марки А и ПВ-3 марки Б расширяют область применения данных покрытий.

Таблица 1

Физико-химические свойства дисперсий и механические свойства водорастворимых технологических подмазочных покрытий на их основе типа ПВ

Наименование показателей	ГОСТ на метод определения	Водорастворимые технологические подмазочные покрытия типа ПВ	
		ПВ-3 марки А	ПВ-3 марки Б
Внешний вид дисперсии		Однородная жидкость без механических примесей	Однородная жидкость без механических примесей
Внешний вид покрытия		Гладкая однородная поверхность белого цвета	Прозрачная гладкая однородная поверхность
Плотность дисперсии при 20 °С, кг/м ³	18995,1	1100...1110	1010...1030
Показатель концентрации водородных ионов (рН)	6243	9,8...10,5	10,3...11,0
Условная вязкость дисперсии по вискозиметру типа ВЗ-246 (ВЗ-4) с диаметром сопла 4 мм при (20±0,5) °С, с	8420	30–40	30–40
Массовая доля нелетучих веществ, %	17537	32,7	20,7
Время высыхания пленки до степени 3 при (20±0,5) °С, ч, не более	19007	2	2
Твердость пленки по маятниковому прибору М-3, усл.ед.	5233	0,55	0,50
Эластичность пленки при изгибе, мм	6806	1	1
Адгезия, балл	151401	1	1
Смываемость покрытия при температуре воды 90...95 °С		Снимается в виде сплошной пленки в течение 5–20 мин	Растворяется в воде в течение 5–10 мин

Подсмазочные покрытия ПВ-3 марок А и Б применяют при вырубке, гибке, штамповке при получении тонкостенных оболочек из труднообрабатываемых материалов, например из коррозионностойких сталей типа 12Х18Н10Т, при низких и средних коэффициентах предельной деформации.

При высоких коэффициентах предельной деформации данные подсмазочные покрытия применяют в сочетании со смазочными покрытиями ВСП-1, ВСП-2, физико-химические свойства которых приведены в табл. 2.

Проводили сравнительные испытания топокомполитов ТА-1 и ТБ-1, представляющие подсмазочные покрытия ПВ-3 марок А и Б с нанесением на данные покрытия смазочного покрытия ВСП-1. Для сравнения выбраны покрытия на основе нитроцеллюлозного цапонлака НЦ-62 без нанесения водного раствора натриевого мыла и с нанесением 30-процентного водного раствора натриевого мыла.

Испытания проводили на торцевой машине трения при следующих режимах и геометрии испытуемых образцов. Нижний образец – плашка диаметром 30 мм, высотой 12 мм из стали 12Х18Н10Т, верхний образец – цилиндр с наружным диаметром 24 мм, внутренним диаметром 16 мм, высотой 24 мм из стали 12ХМ, твердостью HRC 58...60. Покрытия из дисперсий ПВ-3 марок А и Б, а также покрытия на основе цапонлака НЦ-62 наносили на образец из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Испытания проводили при угловой скорости вращения образца $n=40$ мин⁻¹ (линейная скорость $V=0,05$ м/с) при ступенчатом повышении осевой нагрузки 200...2900 Н до критиче-

ской нагрузки заедания. Время испытаний 20 с. При повышении ступенчато осевой нагрузки на 200 Н испытывали один и тот же образец.

Из рис. 2 следует, что испытуемые покрытия ПВ-3 марок А и Б (кривые 3, 4) обладают более низкими коэффициентами трения 0,14...0,24, выдерживают более высокие критические осевые нагрузки до заедания 2400...2450 Н по сравнению с покрытиями на основе цапонлака НЦ-62 (кривые 1, 2) – коэффициенты трения 0,18...0,33, осевые критические нагрузки до заедания 2000...2150 Н.

Топокомполиты ТА-1 и ТБ-1 (кривые 5, 6) превосходят все испытуемые покрытия по антифрикционным свойствам – коэффициенты трения 0,085...0,17, величине критической нагрузки до заедания 2780...2800 Н.

Улучшение антифрикционных свойств топокомполитов ТА-1, ТБ-1 достигается формированием в дисперсиях подсмазочных покрытий ПВ-3 марок А и Б, смазочных покрытиях ВСП-1, ВСП-2 технологическими приемами фрактальных нанокластеров, обеспечивающих образование на контактирующих поверхностях штампового инструмента износостойких пленок. Технология с использованием топокомполитов ТА-1, ТБ-1 была внедрена в производство при получении тонкостенных оболочек, получаемых многопереходной глубокой вытяжкой из коррозионностойких сталей типа 12Х18Н10Т. Нанесение топокомполитов ТА-1, ТБ-1 из водных дисперсий осуществляется на конвейерных, автоматических, роторных линиях, а многопереходная вытяжка осесимметричных оболочек на роботизированных комплексах.

Для нанесения и удаления топокомполитов ТА-1, ТБ-1 используют следующую технологию. Обезжиривание листовых заготовок из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т перед глубокой вытяжкой производят в растворах МС-8, МС-15 или Лабомид-203 при массовой концентрации 15...30 кг/м³ и температуре 50...70 °С, продолжи-

Таблица 2

Физико-химические свойства водорастворимых смазочных покрытий типа ВСП

Наименование показателей	Водорастворимое технологическое смазочное покрытие типа ВСП	
	ВСП-1	ВСП-2
Внешний вид	водорастворимый сухой порошок	
Цвет	белый	коричневый
Запах	специфический	
Содержание жирных кислот, %, не менее	80	
Содержание свободной едкой щелочи, %, не более	0,02...0,04	0,05...0,1
Содержание неомыляемых органических веществ, % к массе жирных кислот, не более	1,0	1,5
Иодное число жирных кислот, %, не более	60	
Температура плавления, °С	260...265	265...270

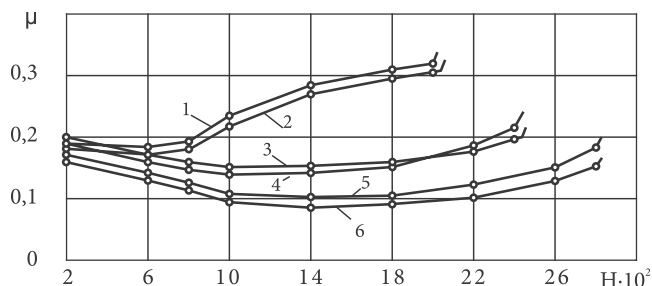


Рис. 2. Зависимость коэффициента μ трения от осевой нагрузки P при испытании: 1 – покрытие на основе цапонлака НЦ-62; 2 – двухслойное покрытие на основе цапонлака НЦ-62 и натриевого мыла, полученного из 30-процентного водного раствора натриевого мыла; 3 – подсмазочное покрытие ПВ-3 марки А; 4 – подсмазочное покрытие ПВ-3 марки Б; 5 – топокомполит ТА-1; 6 – топокомполит ТБ-1



тельностью 5–20 мин. Далее эти заготовки промывают в теплой воде при температуре 40...50 °С в течение 5 мин, затем в холодной воде при температуре 18...20 °С в течение 5–20 мин.

Для получения подсмазочных покрытий используют водные растворы дисперсий ПВ-3 марок А и Б при рабочей условной вязкости (УВ) 30–35 с. Дисперсии покрытий ПВ-3 марок А и Б наносят на металлическую поверхность окунанием, струйным обливом или кистью. Покрытия высушивают при температуре 18...22 °С в течение 1,5–2 ч. При обдувании покрытия горячим воздухом при 40...60 °С время сушки составляет 20–30 мин.

Дисперсии покрытий ВСП-1, ВСП-2 наносят на подсмазочные покрытия ПВ-3 марок А и Б из водных растворов при температуре 50...60 °С окунанием, струйным обливом или кистью. Температуры сушки те же, что и при получении подсмазочных покрытий ПВ-3 марок А и Б. Для удаления композитов с металлической поверхности по окончании технологических процессов штамповки или глубокой вытяжки изделия опускают в ванну с горячей водой при температуре 90...95 °С. Топокомпозит ТА-1 на основе подсмазочного покрытия ПВ-3 марки А удаляется с металлической поверхности в течение 5–10 мин в виде сплошной пленки, а топокомпозит ТБ-1 на основе подсмазочного покрытия ПВ-3 марки Б растворяется в воде в течение 5–10 мин.

Водные растворы отработанных дисперсий и топокомпозитов могут быть использованы в качестве добавок к строительным растворам. Пленки покрытий, топокомпозитов, удаленные с изделий в процессе технологических процессов, высушивают и сжигают.

Таким образом, применение топокомпозитов ТА-1 и ТБ-1 позволяет заменить покрытия на основе цапонлака НЦ-62, расплавов солей, повысить долговечность штампового инструмента и оборудования, улучшить качество поверхностей деформируемых изделий, устранить пожаровзрывоопасность технологических процессов, вредное воздействие лаков, органических растворителей на организм человека, а также загрязнение окружающей среды.

Литература

1. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен – М.: Мир, 1985. – 411 с.

2. Mandelbrot B.V. The fractal geometry of nature / B.V. Mandelbrot N.Y.: Freeman, 1983. – 480 p.

3. Иванова В.С. От дислокации к фракталам. Фрактальная синергетика и «интеллектуальные» материалы / В.С. Иванова // Материаловедение, 2001. – Ч.2. – №1 – С. 22-29.

4. Шульга Г.И. Влияние водорастворимых технологических смазочных материалов на кон-

тактные процессы при листовой штамповке / Г.И. Шульга // Безызносность. Межвуз. сб. науч. ст. / Под общ. ред. проф. А.С. Кужарова. Ростов-н/Д: Изд. центр ДГТУ – 1996. – Вып.4. – С. 141-150.

5. Шульга Г.И. Непрерывные триботехнологии получения тонкостенных оболочек в гибких производственных системах: / Г.И. Шульга // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 1996. – Ч.1 – №2. – С. 60-69.

6. Шульга Г.И. Проблемы триботехники и экологии при обработке материалов технических объектов / Г.И. Шульга, Т.Г. Шульга // Новые технологии управления движением технических объектов: Матер. 2-ой междунар. науч.-техн. конф. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск. ЮРГТУ. – 1999. – С. 148-150.

7. Шульга Г.И. Водорастворимые технологические топокомпозиты для получения тонкостенных оболочек из труднообрабатываемых материалов / Г.И. Шульга // Наука и технологии: труды XXI Российской школы (26-28 июня 2001г, Миасс) М.: 2001. – С. 147-154.

8. Шульга Г.И. Функциональные водорастворимые технологические смазочные средства для обработки материалов / Г.И. Шульга – Ростов н/Д: Ред. ж. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 2004. – 212 с.

9. Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е.И. Исаченков – М.: Машиностроение. – 1978. – 208 с.

10. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик – М.: Металлургия – 1982. – 312 с.

11. Уиксов Е.П. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Уиксов, У. Джонсон, В.Л. Колмагоров и др. Под ред. Е.П. Уиксова, А.Г. Овчинникова – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

12. Шульга Г.И. Наноструктурирование функциональных технологических смазочных материалов для повышения эффективности обработки деталей транспортного комплекса / Г.И. Шульга, А.О. Колесниченко, Е.В. Скринников, Т.Г. Шульга // Инновации в транспортном комплексе. Безопасность движения. Охрана окружающей среды: материалы междунар. научн.-практ. конф. 28-29 октября 2010 г. – Пермь: Пермск. гос. техн. ун-т, 2010. – Т.1. – С. 111-116.

13. Шульга Г.И. Функциональные технологические смазочные материалы, структурированные нанопорошками цветных металлов для повышения эффективности обработки деталей транспортных систем / Г.И. Шульга, А.О. Колесниченко, Е.В. Скринников, Т.Г. Шульга // Вестник Донского государственного технического университета. Спецвыпуск. Т.11. – №10. – 2011. – С. 1867-1873.

14. Каржавин В.В. Металлические покрытия, наносимые в расплавах солей, их исследования в процессах обработки металлов давлением / В.В. Каржавин // Трение и износ. 1992. – Т.13. – №3. – С. 141-150.