

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОРАСТВОРИМОГО ТОПОКОМПОЗИТА ПРИ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКЕ ЛИСТОВЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

*Шульга Г.И., Черников Н.С., Скринников Е.В., Колесниченко А.О.,
Самойленко М.Н.*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, Новочеркасск*

Ключевые слова: глубокая вытяжка, подмазочное, смазочное покрытие, топокомпозит, коэффициент трения, интенсивность износа.

Аннотация. В серийном и массовом производствах современного машиностроения находит широкое применение технологии получения осесимметричных деталей из листовых сталей холодными вытяжкой и глубокой вытяжками. При использовании технологических покрытий и смазочных материалов с низкими смазочными свойствами твердая поверхность матрицы пропахивает канавки или царапает более мягкий металл деформируемой заготовки, развиваются усталостные процессы на поверхностях штампового инструмента. Для вытяжки осесимметричных деталей из коррозионностойких сталей разработан водорастворимый экологически безопасный топокомпозит ТК-2, состоящий из водорастворимого подмазочного полимерного покрытия ПВ-4 и водорастворимого смазочного покрытия ВСП-4. Разработана методика испытаний технологических покрытий на торцевой машине трения «по свежему следу». Проведены сравнительные триботехнические испытания водорастворимого подмазочного покрытия ПВ-4 топокомпозита ТК-2 и применяемого в производственных условиях покрытия на основе цапон-лака НЦ-62. Показаны преимущества триботехнических свойств топокомпозита ТК-2.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF WATER-SOLUBLE TOPOCOMPOSITE DURING DEEP DRAWING OF ALLOY STEEL SHEETS

*Shulga G.I., Chernikov N.S., Skrinnikov E.V., Kolesnichenko A.O.,
Samoilenko M.N.*

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

Keywords: deep drawing, lubricating, lubricating coating, topocomposite, friction coefficient, wear rate.

Abstract. In serial and mass production of modern mechanical engineering, the technology of producing axisymmetric parts from sheet steel by cold drawing and deep drawing is widely used. When using technological coatings and lubricants with low lubricating properties, the hard surface of the matrix plows grooves or scratches the softer metal of the deformed workpiece, and fatigue processes develop on the surfaces of the stamping tool. For drawing axisymmetric parts from corrosion-resistant steels, a water-soluble environmentally friendly topocomposite TK-2 has been developed, consisting of a water-soluble lubricating polymer coating PV-4 and a water-soluble lubricating coating VSP-4. A technique has been developed for testing technological coatings on an end-face friction machine “on a fresh track”. Comparative tribological tests were carried out on the water-soluble lubrication coating PV-4 of the TK-2 topocomposite and the coating based on zapon-varnish NTs-62 used in production conditions. The advantages of the tribological properties of the TK-2 topocomposite are shown.

В серийном и массовом производствах современного машиностроения находит широкое применение технологии получения осесимметричных деталей из листовых сталей. Создание научно-обоснованных технологий получения таких деталей с высоким качеством поверхности и их внедрение в производственные процессы является актуальной научно-производственной проблемой [1-3]. Холодными вытяжкой, глубокой вытяжкой получают осесимметричные, плоские и пространственные детали разнообразных конфигураций и размеров с минимальной металлоемкостью при заданной их прочности и жесткости. При этом обеспечивается высокая производительность труда, низкая себестоимость выпускаемой продукции.

Вытяжка осесимметричных тонкостенных изделий из листовых коррозионностойких сталей типа 12X18H10T представляет сложную задачу, так как последние обладают повышенной склонностью к адгезионному взаимодействию со штамповым инструментом. Физическая адсорбция и хемосорбция молекул технологических смазочных материалов затруднена вследствие образования на поверхности сталей оксидов, обладающих пассивирующими свойствами.

В данных технологических процессах в результате большой степени деформации и малой толщине исходного металла возникает неблагоприятное напряженно-деформированное состояние, что может привести к процессу схватывания, гофрообразования, появлению трещин и разрыва металла [4-6]. Среди них образование в процессах вытяжки, глубокой вытяжки различных дефектов, возникающих на поверхности штампового инструмента и готового изделия, выкрашивание штампового инструмента, которые приводят к возникновению брака. Сложность прогнозирования стойкости штамповой оснастки состоит в том, что ее эксплуатация сопровождается совместным действием двух разрушительных процессов – износа и усталости [3], которые могут ускорять или замедлять действие друг друга.

При пластической деформации заготовки на радиусе матрицы происходит сближение образовавшихся ювенильных поверхностей на расстояние действия межатомных сил и образования в зоне контакта активных дислокационных центров, интенсивное повышение концентрационных вакансий и внедренных атомов. В зонах активных дислокационных центров по вакансионному механизму происходит диффузия между контактируемыми металлами с образованием металлических связей. Возможна достройка электронных уровней. При этом в энергетически выгодных соотношениях 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 также производится абразивное пропахивание и царапание поверхности деформируемой заготовки.

При многократных циклах проведения технологических процессах вытяжки, глубокой вытяжке изделий из листовых сталей в результате усталостных процессов происходит разрушение поверхностных слоев матрицы и пуансона и образующиеся продукты износа также могут производить пропахивание и царапание деформируемой заготовки.

Для устранения адгезии и развития разрушения поверхностей штампового инструмента от усталостных процессов при высоких коэффициентах предельной деформации листовой коррозионностойкой стали на ее поверхность из растворов электролитов наносят медные, цинковые покрытия [4]. Однако адгезия таких покрытий с поверхностью коррозионностойкой стали низкая. При многопереходной вытяжке через одну – две операции такие покрытия необходимо удалять, а затем нанести заново.

Для глубокой вытяжки коррозионностойких сталей в качестве подмазочных покрытий рекомендуют применять полимерные покрытия с использованием органических растворителей [4]. Пленкообразователем таких покрытий является нитроцеллюлоза – НЦ-62, НЦ-134, наполнителями пигменты, перхлорвиниловый лак ХВ 5179 (ХВЛ-21) с добавлением трикрезилфосфата, а летучим растворителем – смесь ацетона, бутилацетона, толуола.

На листовые заготовки наносят металлические покрытия из расплавов солей [7]. 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 $400-500^{\circ}\text{C}$ образуется металлическая связь между заготовкой и покрытием через переходный слой. На поверхности коррозионностойкой стали наносят также оксидные покрытия обработкой листовых заготовок в расплавах нитрита натрия, едкого натрия при температуре $430-500^{\circ}\text{C}$. Для локализации деформаций в тонком слое и улучшения штампуемости горячекатанной листовой коррозионностойкой стали производят ее плакирование алюминием.

Приведенные выше технологические покрытия имеют существенные недостатки. Они не в полной мере обеспечивают долговечность штампового инструмента, качество обрабатываемых поверхностей. Для их нанесения и снятия требуются агрессивные, токсичные электролиты, органические растворители, оказывающие воздействие на организм человека. Взрывоопасность возникает в случае попадания влаги при нанесении покрытий из расплава солей, а пожаровзрывоопасность – при нанесении покрытий из органических растворителей. Утилизация отработавших электролитов, расплавов солей затруднительна, вследствие чего происходит загрязнения окружающей среды.

Актуальной проблемой современного машиностроения является создание для узлов трения современных машин, механизмов, приборов нового класса конструкционных материалов топокомполитов [8-11]. Топокомполиты представляют собой композиционные материалы, внешнее воздействие на которые воспринимается не только в материале покрытия, но и в приповерхностном слое подложки, на которую наносится данное покрытие. То есть топокомполит проявляет комплексные физико-механические характеристики приповерхностного объема в трибосопряжении, которые отличаются от свойств материала покрытия и материала подложки. Наносимые покрытия могут быть однослойными, двухслойными, многослойными, градиентными, композиционными, комбинированными.

Целью работы является разработка технологического водорастворимого двухслойного топокомпозиата ТК-2 для глубокой вытяжки листовых легированных сталей, лишенного перечисленных выше недостатков, а также разработка методики испытаний таких покрытий.

Рассмотрено влияние топокомпозиата ТК-2 на процесс глубокой вытяжки листовых легированных сталей, представляющий собой двухслойное покрытие, состоящее из водорастворимого подмазочного полимерного покрытия ПВ-4, наносимого непосредственно на листовую заготовку и, на которое наносится водорастворимое смазочное покрытие ВСП-4. Обобщенный закон трения при пластической деформации описывается уравнением [1]:

$$\tau = \mu q(1 - \gamma) + \eta \frac{dV}{dz} \gamma, \quad (1)$$

где τ – удельная сила трения между обрабатываемым материалом и инструментом, кгс/мм²; μ – коэффициент трения-скольжения без смазочного материала; q – контактная удельная нагрузка, кгс/мм²; γ – коэффициент сплошности смазывания поверхностей; $\gamma = \frac{A_{см}}{A_{общ}}$, $A_{см}$ – площадь смазанной поверхности контакта, мм²; $A_{общ}$ – общая площадь поверхности контакта, мм²; $\eta \frac{dV}{dz}$ – напряжение сдвига вязкой среды; V – скорость скольжения в зоне контакта, мм/с; η – эффективная вязкость смазочной среды, Па; z – средняя толщина смазочной прослойки, мм.

При обработке давлением коэффициент трения между деформируемой металлической поверхностью изделия с нанесенным эластичным полимерным покрытием ПВ-4 и металлической поверхностью инструмента μ_{II} определяется [12]:

$$\mu_{II} = \mu_A + \mu_{Г} = K_1 \frac{E^1}{\bar{p}^r} tg\delta + K_2 \left(\frac{\bar{p}}{E^1} \right)^n tg\delta, \quad (2)$$

где μ_A – адгезионная компонента коэффициента трения; $\mu_{Г}$ – гистерезисная компонента коэффициента трения; K_1, K_2 – константы, зависящие от условий трения; E^1 – действительная часть комплексного модуля; \bar{p}^r – среднее давление; n – показатели степени; $tg\delta = \frac{E^{11}}{E^1}$ – тангенс угла механических потерь; E^{11} – модуль потерь.

Подставляя выражение (2) в уравнение (1) и, имея в виду, что коэффициент сплошности смазывания поверхностей $\gamma = 0$, определяем удельную силу трения между деформируемым изделием с нанесенным эластичным покрытием и металлической поверхностью инструмента:

$$\tau_{II} = \left[K_1 \frac{E^1}{\bar{p}^r} tg\delta + K_2 \left(\frac{\bar{p}}{E^1} \right)^n tg\delta \right] q. \quad (3)$$

При нанесении смазочного покрытия ВСП-4 на деформируемую металлическую поверхность изделия с предварительно нанесенным эластичным подсмазочным полимерным покрытием в процессе деформирования заготовки и расплавлением граничного слоя смазочного покрытия коэффициент трения $\mu_{СП}$ между данной поверхностью и металлической поверхностью инструмента определяется [7-9]:

$$\mu_{СП} = \mu_M + \mu_H + \mu_\Gamma = \mu_{M_1} + \mu_{M_2} + \mu_H + \mu_\Gamma, \quad (4)$$

где μ_M – составляющая компонента трения в граничном объеме расплавленного покрытия; μ_{M_1} – составляющая компонента трения в объеме расплавленного покрытия в полостях шероховатостей; μ_{M_2} – составляющая компонента трения на участках гидродинамического трения; μ_H – составляющая компонента трения на пиках неровностей.

$$\mu_{СП} = \frac{S_{M_1}\gamma}{p} + \frac{S_{M_2}\gamma}{p} + \frac{S_H(1-\gamma)}{p} + K_3 \left(\frac{\bar{p}}{E^1} \right)^n \operatorname{tg}\delta(1-\gamma), \quad (5)$$

где S_{M_1}, S_{M_2} – напряжение сдвига в объеме смазочного материала в полостях шероховатостей и на участках гидродинамического трения.

$$S_{M_1} = \eta_1 \frac{dV}{dz_1}, \quad (6)$$

$$S_{M_2} = \eta_2 \frac{dV}{dz_2}, \quad (7)$$

S_H – напряжение сдвига смазочного материала на пиках неровностей,

K_3 – коэффициент, учитывающий влияние смазочного покрытия на гистерезисную компоненту коэффициента трения.

Удельная сила трения $\tau_{СП}$ между деформируемой поверхностью с нанесенным эластичным полимерным, смазочным покрытиями и металлической поверхностью инструмента при смешанном режиме определяется:

$$\tau_{СП} = S_{M_1}\gamma + S_{M_2}\gamma + S_H(1-\gamma) + K_3 \left(\frac{\bar{p}}{E^1} \right)^n \operatorname{tg}\delta(1-\gamma)q, \quad (8)$$

при условиях $p_0 > \bar{p} > p_{гидр}$; $S_{M_1}; S_{M_2} \ll S_H$, $\bar{p} = q$, p_0 – среднее упругое (или вязкоупругое) давление на эластичное полимерное покрытие вблизи выступа, $p_{гидр}$ – гидродинамическое давление в полостях шероховатостей, участках гидродинамического трения.

При значениях коэффициента сплошности смазывания контактирующих поверхностей $1 > \gamma > 0$ имеет место между контактирующими поверхностями смешанное трение. Величина удельной гистерезисной силы трения:

$$\tau_\Gamma = K_3 \frac{\left(\frac{\bar{p}}{E^1} \right)^{n+1}}{\left(E^1 \right)^n} \operatorname{tg}\delta(1-\gamma) \quad (9)$$

в зависимости от совместимости смазочного и полимерного покрытий может уменьшаться или увеличиваться.

Разработка новых покрытий и технологических смазочных материалов для вытяжки, глубокой вытяжки осесимметричных изделий включает следующие этапы. Системный анализ трибосистем штампового инструмента, научное обоснование формирования диссипативных самоорганизующихся фрактальных кластеров в технологических смазочных средствах, возможность встраивания их в цепи экологических систем, разработку гибких технологий получения покрытий, повторного их использования и утилизации [11].

Подсмазочное покрытие ПВ-4 в исходном состоянии представляет собой дисперсию водорастворимого полимера с добавками. При нанесении водной дисперсии покрытия ПВ-4 на стальные поверхности и ее высушивании образуется покрытие, обладающее высокими адгезионными свойствами к поверхности коррозионностойких сталей, нагрузочной способностью и относительным удлинением при растяжении.

Смазочное покрытие ВСП-4 в исходном виде представляет гранулированный твердый материал, а при растворении в воде – 10-50%-ный водорастворимый концентрат, который наносится на поверхность покрытия ПВ-4 путем окунания деталей в данный концентрат. После высушивания покрытий ВСП-4 и ПВ-4 водорастворимый топокомпозит ТВ-2 при вытяжке осесимметричных изделий листовых коррозионностойких сталей является антифрикционным материалом, обеспечивающим эффективное проведения технологического процесса, снижением изнашивания штампового инструмента, разрушения от усталостных процессов.

Проводили сравнительные испытания антифрикционных и противоизносных свойств подсмазочного покрытия ПВ-4 и покрытия на основе цапон-лака НЦ-62. Данные покрытия в основном обеспечивают нагрузочную способность двухслойным покрытиям, антифрикционные и противоизносные свойства в случае износа смазочного покрытия ВСП-4 при применении топокомпозита ТВ-2 и износа покрытия на основе натриевого мыла при применении цапон-лака НЦ-62.

Определение суммарной удельной силы (коэффициента) трения при листовой вытяжке оболочек представляет сложную задачу, так как необходимо определение составляющих удельных сил (коэффициента) трения на закруглении рабочей кромки матрицы, под прижимом, в цилиндрической части матрицы. При вытяжке, глубокой вытяжке листовых сталей между контактирующими поверхностями пуансона, матрицы и деформируемым изделием с нанесенным на его поверхность смазочным материалом или покрытием имеет место трение скольжения "по свежему следу".

В лабораторных условиях для определения удельной силы (коэффициента) трения при проведении сравнительных испытаний смазочных материалов, подсмазочных и смазочных покрытий и их сочетаний может быть на торцевой машине трения использован имитирующий метод скольжения "по свежему следу". При реализации данного метода цилиндрический индентор с контактирующей поверхностью в виде сферы скользит по плоскости диска и дополнительно перемещается по радиусу диска с нанесенным на его поверхность испытуемых покрытий. Радиус контактирующей сферы равен радиусу

цилиндрической части индентора. Начальный диаметр контакта d между сферой индентора радиуса R и плоскостью до начала скольжения контактирующих поверхностей определяли [13, 14]:

$$d = \sqrt{6PR \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (10)$$

где P – осевая нагрузка, Н; R – радиус сферы индентора, мм; μ_1, μ_2, E_1, E_2 , Н/мм² – коэффициенты Пуассона и модули упругости индентора и диска.

Цилиндрический индентор диаметром 10 мм, длиной 15 мм, радиусом сферы 5 мм изготавливали из стали У8 с последующей термообработкой до твердости HRC 58-60. Контробразец – диск \varnothing 350 мм изготавливали из стали 40Х7 с шероховатостью поверхности $R_a = 1,6 - 3,2$ мкм. Испытания проводили при изменении скорости диска от 1 до 10 м/с. Частоту вращения диска установили цифровым тахометром ЦАТ-3М. Силы трения, возникающие при скольжении индентора, измеряли методом тензометрирования. Сигнал с тензодатчиков поступал на тензоусилитель Т-5А и фиксировался светолучевым осциллографом, износ индентора измеряли на лабораторных весах ВЛР-200. Весовую интенсивность износа индентора J_q г/см³ определяли:

$$J_q = \frac{q}{S_H L}, \quad (11)$$

где q – вес изношенного индентора, г; S_H – номинальная площадь контакта, см²; L – путь трения, см.

Начальная нагрузка на индентор составляла 200 Н. Для определения критического значения ее ступенчато повышали каждый раз на 200 Н. Длина пути трения при испытании покрытий составляла 20 м. При листовой вытяжки оболочек из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т в производственных условиях применяется подсмазочное покрытие на основе цапон-лака НЦ-62 (ТУ 6-21-090502-2-90), на которое наносится в качестве смазочного материала 20-30%-ный водный раствор натриевого мыла. Недостатком данного подсмазочного покрытия является использование для его нанесения и удаления пожаровзрывоопасного, токсичного растворителя ацетона.

Разработанное водорастворимое технологическое подсмазочное покрытие ПВ-4 [7-9] лишено недостатков покрытия на основе цапон-лака НЦ-62. Дисперсию покрытия ПВ-4 наносили на заготовки из водного раствора. После выполнения технологических операций вытяжки, глубокой вытяжки покрытие ПВ-4 удаляли размещением изделий в ваннах с водой или щелочными растворами при температуре 90-95°С. Использование водных растворов подсмазочного покрытия ПВ-4 при их нанесении и снятии позволяет избавиться от использования токсичных растворителей, оказывающих вредное воздействие на работающих, устранить пожаровзрывоопасность технологических процессов.

Цапон-лак НЦ-62 наносили на предварительно обезжиренную ацетоном поверхность диска, высушивали на воздухе при температуре 18-24°С в течение 15-20 мин. Дисперсию покрытия ПВ-4 наносили на предварительно промытую водой и содовым раствором поверхность диска, высушивали на воздухе в течение 15-20 мин при температуре 70-80°С. Толщина покрытий на основе цапон-лака

НЦ-62 и ПВ-4 после их высушивания составляла 30-40 мкм. Результаты сравнительных испытаний антифрикционных и противоизносных свойств подмазочного покрытия на основе цапон-лака НЦ-62 и водорастворимого подмазочного покрытия ПВ-4 приведены на рисунках 1 и 2.

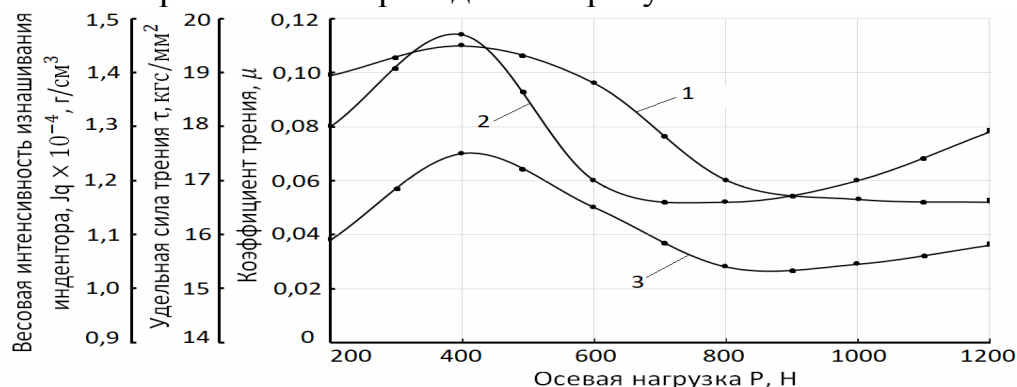


Рис. 1. Зависимость от осевой нагрузки P при испытании покрытия на основе цапон-лака НЦ-62 со скоростью вращения диска от 0 до 2,5 м/с: 1 – коэффициента трения μ ; 2 – удельной силы трения τ ; 3 – весовой интенсивности изнашивания индентора J_q

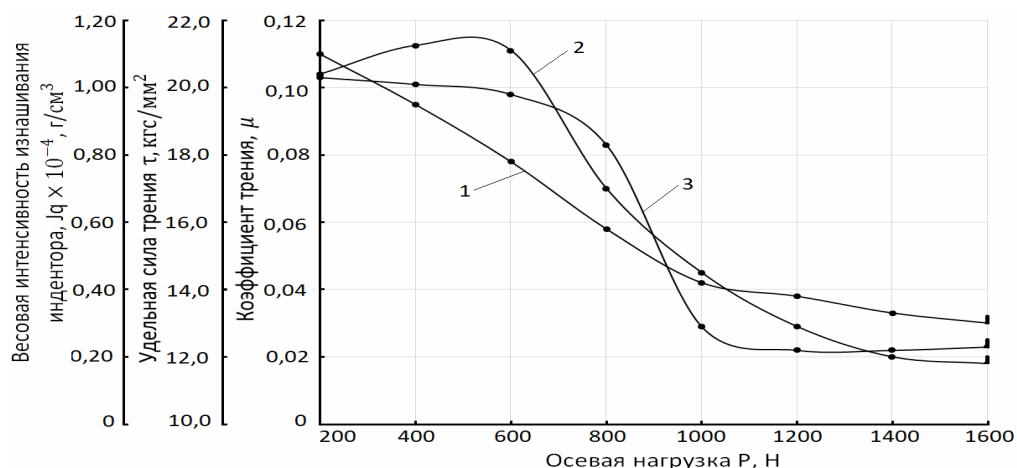


Рис. 2. Зависимость от осевой нагрузки P : при испытании подмазочного покрытия ПВ-4 со скоростью вращения диска от 0 до 2,5 м/с: 1 – коэффициента трения μ ; 2 – удельной силы трения τ ; 3 – весовой интенсивности изнашивания индентора J_q

Анализ результатов сравнительных испытаний, приведенных на рисунках 1 и 2, показал, что покрытия на основе цапон-лака НЦ-62 до критической нагрузки заедания $P_{k1} = 1200$ Н подмазочное покрытие ПВ-4 до критической нагрузки заедания $P_{k2} = 1600$ Н защищали поверхность вращающегося диска от непосредственного контакта индентора. С увеличением нагрузки P , скорости диска V , коэффициенты трения μ , удельные силы трения τ пар трения индентор – диск с подмазочным покрытием ПВ-4, индентор – диск с покрытием на основе цапон-лака НЦ-62 уменьшались. Полученные результаты объясняются уменьшением адгезионной $\mu_{адг.}$ и гистерезисной $\mu_{гис.}$ составляющих коэффициента трения μ испытываемых пар при увеличении скорости.

При нанесении на деформируемую заготовку топокомпозита ТК-2 – подмазочного полимерного покрытия ПВ-4 и смазочного покрытия ВСП-4, устраняется контактирование штампового инструмента и деформируемого изделия, локализуются сдвиговые деформации в граничных смазочных слоях топокомпозита, содержащего фрактальные кластеры, антифрикционные добавки

[15]. В результате повышается долговечность штампового инструмента, улучшатся качество поверхностей осесимметричных изделий.

Список литературы

1. Исаченков Е.Н. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
2. Унксов Е.П., Джонсон У., Колмагоров В.Л., Попов Е.А., Сафаров Ю.С., Венгер Р.Д., Кудо Х., Осакада К., Пью Х.Л.Д., Соуерби Р. Теория пластических деформаций металлов; под ред. Е.П.Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. Корнилова А.В. Разработка методов обеспечения долговечности силовых деталей кузнечно-прессовых машин и инструмента: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – М: Моск. гос. технол. ун-т «Станкин», 2009. – 40 с.
4. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке давлением: справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
5. Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Lebedinsky I.Yu. Complex Method for Evaluating Lubricating Properties of Technological Tools and Stresses When Drawing Products from Sheet Steel // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) Volume I. Lecture Notes in Mechanical Engineering. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_121.
6. Шульга Г.И., Колесниченко А.О., Скринников Е.В., Лебединский И.Ю., Шульга Т.Г. Влияние водорастворимого технологического ревитаметаллизанта РВ-18 на величины напряжений при глубокой вытяжке листовых сталей // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2021. – Т. 1. – С.43-49. – doi.org/10/17213/1560-3644-2021-2.
7. Коржавин В.В. Металлические покрытия, наносимые в расплавах солей, их исследования в процессах обработки металлов давлением // Трение и износ. – 1992. – Т.13, № 3. – С. 141-150.
8. Воронин Н.А. Топокомпози́ты новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения // Трение и износ. – 1999. – Ч. 1.– Т. 20, №3. – С. 313-320; // Трение и износ. – 1999. – Ч. 2. – Т. 20, №5. – С. 533-544.
9. Воронин Н.А. Актуальные проблемы создания топокомпози́тов новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т.13, №4(3). – С. 695-698.
10. Кавалейро А., Хоссона де Д. Наноструктурные покрытия. – М.: Техносфера, 2011. – 752 с.
11. Шульга Г.И. Функциональные водорастворимые технологические смазочные средства для обработки материалов. – Ростов н/Д: Ред.: ж. «Изв. вузов. Сев.-Кавк.регион», 2004. – 212 с.
12. Мур Л. Трение и смазка эластомеров. – США, 1972. – Пер. с англ. канд. хим. наук Г.И. Бродского – М.: Химия, 1977. – 263 с.
13. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007.– 496 с.
14. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
15. Белый В.А., Свириденко А.Н., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976 – 432 с.

Сведения об авторах:

Шульга Геннадий Иванович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы»;

Черников Никита Сергеевич – аспирант;

Скринников Евгений Валерьевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Общеинженерные дисциплины»;

Колесниченко Алексей Олегович – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы»;

Самойленко Михаил Николаевич – аспирант.