

проход (7) для некоторых сталей. Видно, что предельные коэффициенты вытяжки соответствуют оценке обрабатываемости сталей, приведенной в табл. 1. Так, для стали 10 с высокой обрабатываемостью $\mu_p = 1,81$, а для стали 50ХН с низкой обрабатываемостью $\mu_p = 1,2$. Для большинства сталей предельный коэффициент вытяжки за один проход $\mu_p = 1,2 - 1,5$, что соответствует практике прокатного и волочильного производства.

Выводы. Предложен вариант количественной оценки обрабатываемости металлов по стандартным методам испытаний. Показано, что расчетная величина обрабатываемости хорошо совпадает с качественными оценками, приведенными в литературе. Также получены связи научных и инженерных характери-

стик оценки деформируемости для использования результатов научных исследований в заводской практике, ориентируясь на стандартные методы испытаний. В качестве примера приведены расчеты пластичности и предельного коэффициента вытяжки за один проход для некоторых сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Краткий справочник металлста / Под ред. А.Н. Маслова. – М.: Машиностроение, 1971. – 767 с.
2. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.

© 2013 г. Г.А. Орлов
Поступила 24 декабря 2012 г.

УДК 621.039

Ал.В. Серебряков¹, А.И. Слесарев², Ан.В. Серебряков³

¹ООО «Новые технологии труб»

²Уральский федеральный университет

³ОАО «Первоуральский новотрубный завод»

АДГЕЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА В КОНТАКТЕ ТРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТ–МЕТАЛЛ

Аннотация. Для процессов обработки металлов давлением характерно адгезионное взаимодействие металла с инструментом. Последствиями являются брак изделия и необходимость смены инструмента. Рассмотрена проблема, как осуществить выбор материала инструмента. Описан механизм развития трещин адгезионного разрушения поверхностного слоя металла на примере волочения труб на оправке. На основе анализа работ по адгезии твердых тел высказана гипотеза, что адгезионная активность материала инструмента связана с его работой выхода электронов. Методом фотостимулированной экзоелектронной эмиссии определена работа выхода электронов ряда керамических материалов. Установлена зависимость между работой выхода электронов материала инструмента и шероховатостью поверхности металла. Предложен критерий выбора материала инструмента и разработан способ волочения труб принципиально нового качества.

Ключевые слова: волочение труб, адгезия, разрушение, поверхностный слой, деформируемый металл, шероховатость, материал инструмента, электронная эмиссия.

METAL SURFACE LAYER ADHESION DESTRUCTION AT TOOL-METAL TORSION CONTACT

Abstract. Adhesive interaction of metal products with a tool inherent in the process of metal forming. Defects on the products and tools out of the order are the consequences of this. The problem of the choice of material for the instrument has been considered. On the example of mandrel tube drawing mechanism of fracture of adhesive fracture surface layer of metal has been described. Based on an analysis of the solids adhesion hypothesized that the adhesive activity is associated with the electron work function of the material tools. By method of photo-stimulated exoelectron emission electron work function for a number of ceramic materials has been determined. The relationship between the electron work function of the material and surface roughness of workpiece was detected. Criterion for selecting the tool material is formulated and a method of tube drawing fundamentally new quality has been developed.

Keywords: tube drawing, adhesion, the fracture, the surface layer, the deformation of the metal, roughness, the material for the instrument, electron emission.

Для процессов обработки металлов давлением характерно адгезионное взаимодействие металла с инструментом. Это взаимодействие приводит к переносу (налипанию) деформируемого металла с изделия на инструмент, последствиями которого являются брак изделия и необходимость смены инструмента.

Проблема налипания недостаточно изучена. В частности, в литературе отсутствуют сведения, какие

именно свойства материала инструмента предопределяют налипание металла, отсутствуют также критерии выбора материала инструмента.

Практическое решение проблемы налипания методами механики обработки металлов давлением не представляется возможным. Решение этой задачи возможно путем установления связи между процессом налипания металла с известными физическими процессами и свойствами материала инструмента.

В работе представлены результаты исследования, которые позволили выявить свойства материала инструмента, предопределяющие адгезионное разрушение металла в контакте трения инструмент – металл, и предложить критерий выбора материала инструмента.

Выбор материала инструмента

На практике для снижения налипания в качестве материала инструмента применяют керамические материалы [1]. Керамический материал (керамика) – это материал на основе тугоплавких соединений, т.е. соединений неметаллов III – VI групп периодической системы элементов друг с другом и(или) с любыми металлами. Такими соединениями являются бориды, карбиды, нитриды и оксиды металлов или сложные соединения на их основе. Термин керамика относится к объемным телам, пленкам, покрытиям. Частным случаем керамики являются композиционные материалы (керметы или твердые сплавы), состоящие из одной или нескольких керамических и металлических фаз. В качестве керамических фаз обычно используют бориды, карбиды, нитриды и оксиды металлов, а металлических – металлы, например Co, Ni, Mo и др. [2].

Что касается практического применения керамических материалов, то их использование в контакте трения инструмент – металл основывается лишь на субъективных и эмпирических критериях. Это относится, в частности, к твердости, которая на практике часто считается эквивалентной понятию «высокой прочности на износ и истирание».

Вместе с тем, как показывает практика, различные керамические материалы со сходными характеристиками твердости проявляют по отношению к одному и тому же металлу различную активность с точки зрения адгезионного взаимодействия. Критериев же, которые позволяли бы сделать выбор между различными материалами со сходными характеристиками свойств, в настоящее время нет.

Триботехнические исследования керамических материалов в основном сосредоточены на изучении их сравнительной износостойкости. На основе экспериментов обобщена связь между абразивной износостойкостью и физико-механическими свойствами материалов [3]. Подобные эмпирические соотношения приемлемы для однотипных материалов, полученных по единой технологии и тщательно аттестованных по химическому составу.

Итак, проблема состоит в том, как осуществить выбор между различными группами материалов или различными материалами внутри группы, который позволил бы исключить адгезионное разрушение поверхностного слоя металла в контакте трения инструмент – металл. Решение этой проблемы тем более важно, что сейчас на рынке появляется большое количество разных видов керамических материалов.

Адгезионное разрушение поверхностного слоя металла

При сближении двух твердых тел между атомами их поверхностных слоев возникает взаимодействие, которое принято называть адгезионным, само явление образования связей между контактирующими поверхностями называется адгезией.

Следует различать явления адгезии и когезии. Когезия обусловлена силами, которыми атомы или молекулы связаны друг с другом в объеме материала. Энергией когезионного взаимодействия определяется прочность твердых тел. Если два различных (или одинаковых) материала контактируют с сохранением границы раздела, взаимодействие их поверхностей связано с проявлением сил адгезии.

В контакте трения твердых тел адгезионное взаимодействие наблюдается даже в условиях смазки. Роль смазки сводится к снижению адгезионных сил, но необязательно к их исключению. Чем эффективней смазка, тем в большей степени она обеспечивает уменьшение адгезионного взаимодействия на границе раздела [4].

В качестве примера, иллюстрирующего адгезионное взаимодействие металла с инструментом, на рис. 1 показана поверхность оправки после волочения трубы из стали 08X18H10T. На поверхности оправки видно налипание (перенос) металла в виде наплыва. Это свидетельствует о том, что адгезионное взаимодействие в контакте трения сильнее, чем когезионные связи в металле. Срез при этом происходит в объеме металла и ведет к его переносу на инструмент.

На рис. 2 показана внутренняя поверхность трубы из стали 08X18H10T после волочения. На поверхности трубы видны борозды пропахивания, оставленные налипшими на инструмент частицами металла (линии, параллельные направлению волочения), и поперечные трещины (серия линий, перпендикулярных к направлению волочения).

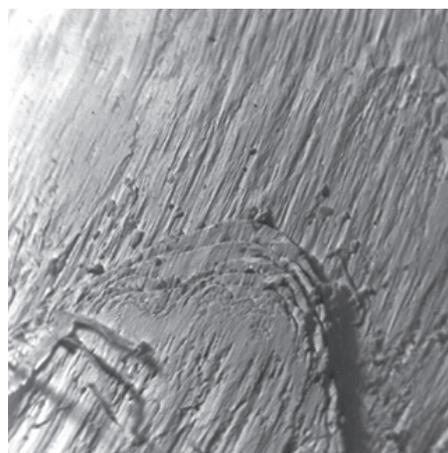


Рис. 1. Микрофотография поверхности оправки из твердого сплава BK15 после волочения трубы из стали 08X18H10T, ×80

Механизм развития трещин адгезионного разрушения металла, показанных на рис. 2, можно представить в виде схемы (рис. 3). Металл перемещается относительно индентора. Образование адгезионного контакта, более прочного, чем когезия на полосе скольжения в металле, приводит к увлечению металла и его отделению вдоль полосы скольжения. Так как прочность адгезионной связи на границе раздела превышает когезионную прочность металла, образуется наплыв. При дальнейшем перемещении наплыв металла срезается и образуется налипшая частица. Представленный на рис. 2, 3 процесс адгезионного разрушения имеет две стадии. Первая стадия – образование напльва и несплошности на поверхности металла, вторая – срез напльва с образованием трещины и налипшей частицы. Эта частица в дальнейшем пропахивает поверхность металла.

Рассмотренный механизм взаимодействия металла с инструментом условен, но, тем не менее, позволяет феноменологически представить адгезионное разрушение поверхностного слоя и нарушение чистоты поверхности металла.

Электронная природа адгезии твердых тел

При сближении двух твердых тел на расстояние, соизмеримое с параметрами решетки, происходит объединение валентных электронов и образование общего электронного облака, взаимодействующего с атомами обеих поверхностей. Образование такой металлической связи представляет собой адгезионное взаимодействие (сцепление, прилипание) двух твердых тел [5].

В процессе трения материал инструмента подвержен энергетическому воздействию: механической и термической активации. Упругая деформация и нагрев материала повышают энергию его атомов. Слабосвязанные электроны в возбужденных атомах забрасываются на более высокие энергетические уровни, что

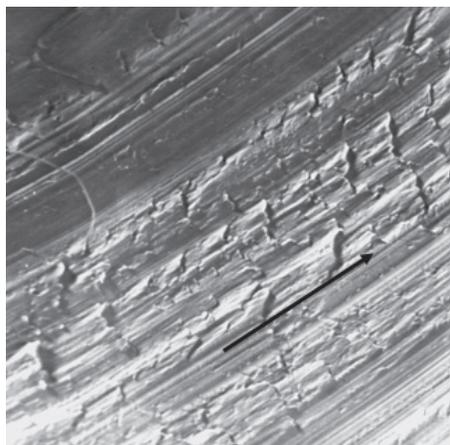


Рис. 2. Микрофотография внутренней поверхности трубы из стали 08X18N10T после волочения:
(→) – направление волочения; материал оправки – твердый сплав BK15, $\times 80$

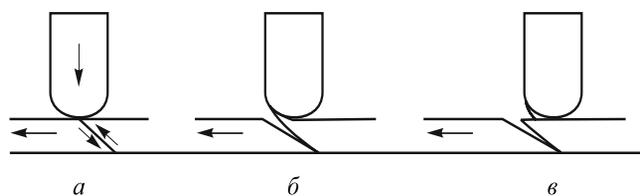


Рис. 3. Механизм адгезионного разрушения поверхностного слоя металла:

a – образование полос скольжения; *б* – начало разрушения; *в* – формирование трещины и налипшей частицы

ведет к повышению энергии решетки и, как следствие, к снижению работы выхода электрона. Те же самые процессы происходят в деформируемом металле. Влияние энергетического воздействия на материал сводится по существу к активации экзоэлектронной эмиссии с его поверхности и, тем самым, обеспечению интенсивного электронного обмена между поверхностями трения [6].

Для выхода электронов с поверхности требуется определенное, зависящее от материала, количество энергии. Тугоплавкие соединения: карбиды, нитриды и оксиды металлов имеют разный тип связи, точнее разные соотношения металлического, ковалентного, ионного взаимодействия [7]. Эти различия проявляются в разных значениях работы выхода электронов, которая определяет энергетический порог возбуждения материала. Чем выше этот порог, тем больше энергетические затраты для возбуждения материала и выхода электронов с его поверхности.

Отсюда следует, что интенсивность адгезионного взаимодействия должна быть связана с работой выхода электронов: чем больше работа выхода электронов, тем меньше интенсивность адгезионного взаимодействия.

Работа выхода электронов керамических материалов и качество поверхности металла

Для экспериментальной проверки существования такой зависимости были проведены исследования электронной эмиссии ряда керамических материалов и адгезионного взаимодействия этих материалов в контакте трения инструмент–металл.

В табл. 1 приведены значения работы выхода электронов ряда керамических материалов на основе тугоплавких соединений: карбидов (WC, SiC, ZrC, B₄C), нитридов (TiN, AlN, Si₃N₄, BN), оксидов (Al₂O₃, ZrO₂) металлов и комбинированных соединений [TiCN, (TiCN)_mO_n]. Эмиссионные свойства этих материалов исследовали с использованием метода фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии. Образцы изготавливали в виде таблеток диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. Поверхность образцов обработана алмазным кругом и подвергнута полированию алмазной пастой до шероховатости $R_a = 0,32$ мкм. Исследования выполнены на автоматизированном сканирующем дефектоскопе [8].

Таблица 1

Работа выхода электронов керамического материала

Керамический материал		Работа выхода, φ, эВ
Тип соединения	Основной состав	
Карбиды	WC	3,8
	SiC	4,0
	B ₄ C	4,3
	ZrC	4,6
Нитриды	BN	4,4
	Si ₃ N ₄	4,7
	TiN	4,9
	AlN	4,9
Комбинированные	TiCN	5,2
	(TiCN) _m O _n	5,5
Оксиды	ZrO ₂	5,8

Как видно из табл. 1, в ряду материалов: карбиды, нитриды, комбинированные соединения, оксиды работа выхода электронов возрастает в направлении от карбидов к оксидам. Наименьшее значение работы выхода имеет твердый сплав на основе карбида вольфрама (WC – 15 % Co). Наибольшее значение работы выхода имеет керамика на основе диоксида циркония (ZrO₂ – 20 % Al₂O₃ – 4 % Y₂O₃).

Исследования адгезионного взаимодействия этих материалов в контакте трения инструмент–металл проведены при волочении на оправке труб из стали 08X18H10T. В качестве материала оправки использовали керамику: WC, TiCN, (TiCN)_mO_n, ZrO₂. Работа выхода электронов для этих материалов приведена в табл. 1.

Волочение труб на оправке проводилось по маршруту: 16×1,5 → 12×1,2 мм. В качестве технологической смазки использовался хлорированный парафин марки ХП-600. Поверхность оправок обработана алмазным кругом и подвергнута полированию алмазной пастой до шероховатости R_a = 0,32 мкм.

Адгезионное взаимодействие инструмента с металлом оценивали по состоянию внутренней поверхности труб до и после волочения. Оценка состояния поверхности производилась путем определения параметра шероховатости R_a по ГОСТ 2789-73. Измерения параметра R_a производили в соответствии с ГОСТ 2789-73 и осуществляли на профилометре модели 296 (тип II). По результатам измерений определяли минимальное и максимальное значение, вычисляли выборочное среднее значение параметра R_a. Данные представлены в табл. 2 и на рис. 4, 5.

На рис. 4 представлена зависимость шероховатости поверхности трубы от работы выхода электронов материала инструмента. На рис. 5 показана шероховатость поверхности трубы и диаграмма работы выхода электронов ряда керамических материалов.

Как видно из рис. 4, чем больше работа выхода, тем меньше среднее значение параметра шероховатос-

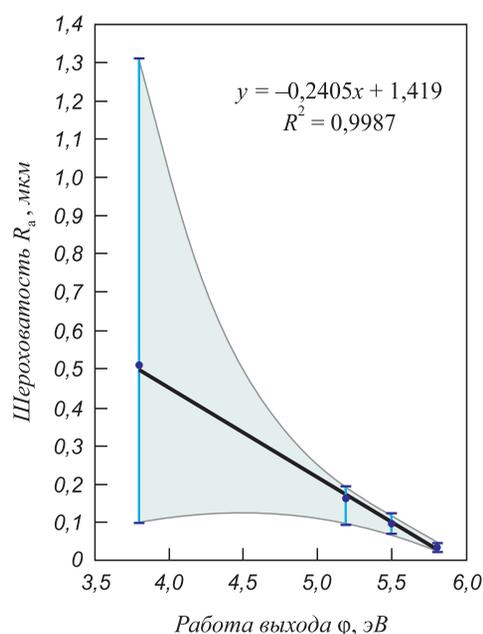


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности трубы от работы выхода электронов материала инструмента

Таблица 2

Состав и работа выхода электронов материала инструмента, шероховатость поверхности труб

Состав материала инструмента	Работа выхода φ, эВ	Шероховатость поверхности труб, R _a , мкм	
		перед волочением	после волочения
WC – 15 % Co	3,8	0,92 – 1,07 1,02	0,10 – 1,31 0,51
78 % TiCN – Mo, Ni	5,2		0,09 – 0,19 0,16
не менее 70 % (TiCN) _m O _n – Zr, Ta, Nb	5,5		0,07 – 0,12 0,09
ZrO ₂ –20 % Al ₂ O ₃ –4 % Y ₂ O ₃	5,8		0,023 – 0,044 0,033

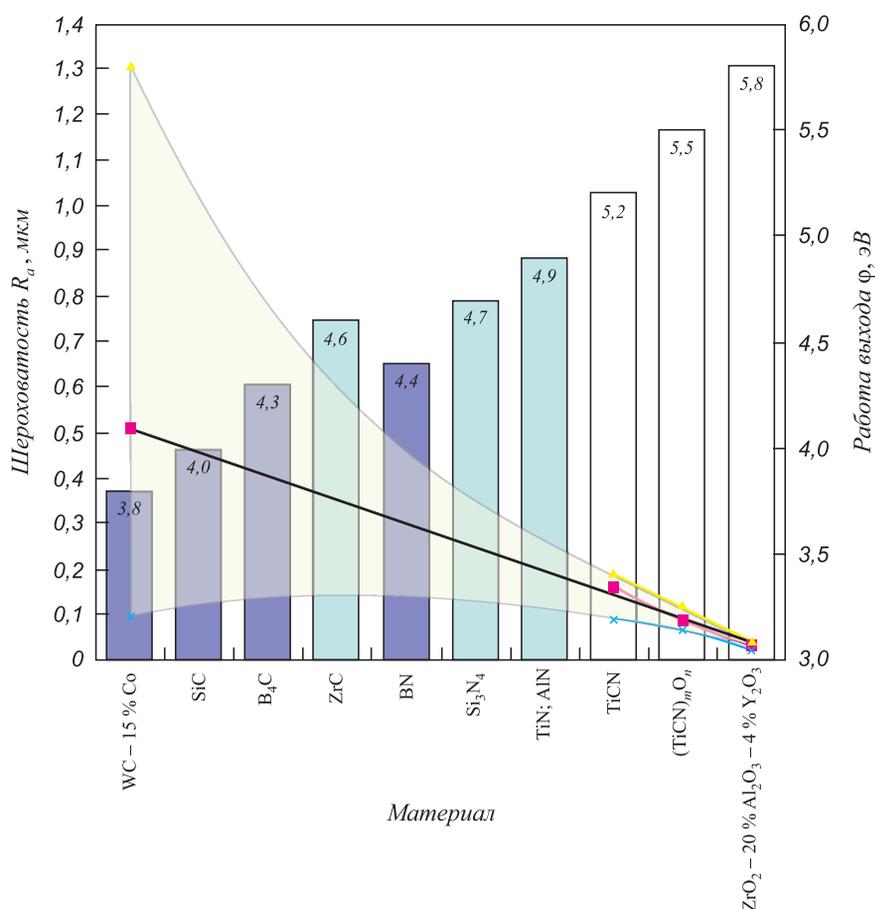


Рис. 5. Шероховатость поверхности трубы и диаграмма работы выхода электронов для керамических материалов

ти R_a . Эта зависимость описывается линейным уравнением при коэффициенте достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9987$. Поле рассеивания параметра R_a , ограниченное на рис. 4 тонкими линиями, также зависит от работы выхода: чем больше работа выхода, тем меньше поле рассеивания параметра шероховатости R_a . Эти результаты показывают, что адгезионное взаимодействие связано с работой выхода электронов: чем больше работа выхода электронов, тем меньше адгезионное взаимодействие инструмента с металлом.

Из рис. 4 также следует, что для достижения субмикронной чистоты поверхности труб с параметром шероховатости R_a , например не более 1,0 мкм, работа выхода электронов должна быть не менее 4,0 эВ. Этому значению работы выхода электронов, как видно из рис. 5, удовлетворяют материалы на основе следующих тугоплавких соединений: SiC, B₄C, ZrC, BN, Si₃N₄, TiN, AlN, TiCN, (TiCN)_mO_n, ZrO₂.

Для достижения чистоты поверхности труб с параметром шероховатости R_a , например не более 0,2 мкм, работа выхода электронов должна быть не менее 5,2 эВ. Этому значению работы выхода электронов, как видно из рис. 5, удовлетворяют материалы на основе следующих керамических материалов: TiCN, (TiCN)_mO_n, ZrO₂. Причем выбор материала на основе диоксида циркония ZrO₂ предпочтительнее.

Этот вывод подтверждают результаты исследований состояния поверхностного слоя металла после волочения труб. Анализ состояния поверхности проводили на растровом электронном микроскопе РЭМ-200 в режиме вторичных электронов. Увеличение варьировалось от 80 до 1200. Область просмотра поверхности составляла 5 – 10 мм в продольном и 2 – 3 мм в поперечном направлениях образца. Наиболее характерные участки поверхности фотографировались при увеличении 400 и представлены на рис. 6.

На рис. 6, а видны следы интенсивного адгезионного взаимодействия и разрушения поверхностного слоя металла. На рис. 6, б, в, г дефекты поверхности, характерные для адгезионного разрушения, отсутствуют. Видны лишь вытянутые в направлении волочения углубления, представляющие собой остатки рельефа поверхности заготовки. Это указывает на качественное изменение механизма фрикционного взаимодействия между инструментом и металлом в результате снижения интенсивности адгезии. И как видно из рис. 6, б, в, г наибольшее «выглаживание» поверхности металла достигается при использовании в качестве материала оправки ZrO₂ – 20 % Al₂O₃ – 4 % Y₂O₃ (рис. 6, г).

Выводы. Рассмотрено адгезионное разрушение поверхностного слоя металла на примере волочения на оправке труб из нержавеющей стали. На основе анализа

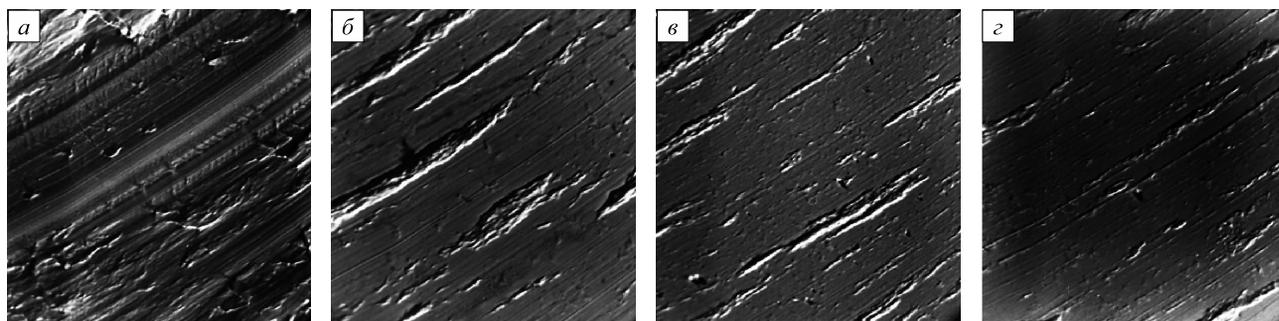


Рис. 6. Микрофотография поверхности трубы из стали 08X18H10T после волочения на оправке:
 а – WC – 15 % Co; б – TiCN; в – $(\text{TiCN})_m\text{O}_n$; з – ZrO_2 – 20 % Al_2O_3 – 4 % Y_2O_3 , $\times 400$

работ по адгезии твердых тел высказана гипотеза, что адгезионная активность материала инструмента связана с работой выхода электронов. Методом фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии определена работа выхода электронов ряда керамических материалов. Установлена зависимость между работой выхода электронов материала инструмента и параметром шероховатости R_a поверхности металла. Предложен критерий выбора материала инструмента и разработан способ волочения труб с субмикронной чистой поверхностью [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берин И.Ш., Днестровский Н.З. Волочильный инструмент. – М.: Металлургия, 1971. С. 27 – 28.
2. Словарь-справочник по новой керамики Е.Л. Шведков, И.И. Ковенский, Э.Т. Денисенко, А.В. Зырин. – Киев: Наукова думка, 1991. С. 82 – 85.
3. Хрущов М.М. // Поверхность: физ.химия, механика. – 1988. № 6. С. 110 – 117.
4. Бабли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Под ред. А.И. Свириденко. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
5. Сахачки Г.П. Технология сварки металлов в холодном состоянии. – Киев: Наукова думка, 1979. – 296 с.
6. Дерягин Б.Б., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1973. – 279 с.
7. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Справ. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отд., 1989. – 368 с.
8. Кортон В.С. и др. // Дефектоскопия. 1996. № 1. С. 50 – 60.
9. Пат. 2399448 РФ. Способ волочения труб / А.В. Серебряков, А.И. Слесарев, С.П. Буркин и др. Опубл. 20.09.2010. Бюл. № 26.

© 2013 г. Ал.В. Серебряков, А.И. Слесарев,
 Ан.В.Серебряков
 Поступила 12 декабря 2012 г.