

- composition during high-temperature synthesis under the condition of heating with high-frequency electromagnetic fields // Journal of Synchrotron Radiation. 2019. Vol. 26. Iss. 2. P. 422–429.
9. Loginova M., Sobachkin A., Sitnikov A., Yakovlev V., Filimonov V., Myasnikov A., Sharafutdinov M., Tolochko B., Gradoboev A. Synchrotron in situ studies of mechanical activation treatment and  $\gamma$ -radiation impact on structural-phase transitions and high-temperature synthesis parameters during the formation of  $\gamma$ -(TiAl) compound // Journal of Synchrotron Radiation. 2019. Vol. 26. Iss. 5. P. 1671–1678.
10. Способ получения монофазного интерметаллидного сплава с высокой степенью однородности на основе титана (патент на изобретение) / А.А. Ситников, М.В. Логинова, В.И. Яковлев, В.Ю. Филимонов, А.В. Градобоев, А.В. Собачкин // Пат. 2698081 Рос. Федерация : МПК С22С 14/00 (2006.01), В22F 3/24 (2006.01) ; патентообладатель Алтайский государственный технический университет им И.И. Ползунова. – № 2019108654 ; заявл. 26.03.2019 ; опубл. 21.08.2019, Бюл. № 24.

### ЛАЗЕРНОЕ ОПЛАВЛЕНИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СТАЛИ 10P6M5 И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ИЗНОСА В ПАРЕ ТРЕНИЯ

*С.Ф. Гнусов, д.т.н., проф., Е.А. Федин<sup>а</sup>, магистр,  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск пр. Ленина 30, тел. (3822)-12-34-56,  
<sup>а</sup> E-mail: jakson1974@mail.ru*

**Аннотация:** В работе исследуется интенсивность изнашивания покрытий на основе стали 10P6M5 в триботехническом контакте «колесо – две колodки» после дискретного поверхностного лазерного оплавления в паре трения с термообработанной шарикоподшипниковой сталью. Установлено, что исходное покрытие, имеющее в своем составе большую объемную долю хрупкой составляющей не способно эффективно сопротивляться износу и приводят к преждевременному выкрашиванию больших конгломератов композиционного покрытия. Покрытия после лазерного оплавления в оплавленных участках имеют только 47% мартенсита от общего объема матрицы, что позволяет эффективно релаксировать возникающие напряжения.

**Abstract:** The paper investigates the wear rate of coatings based on 10R6M5 steel in the tribotechnical contact "wheel - two pads" after discrete surface laser melting in a pair of friction with heat-treated ball bearing steel. It was found that the initial coating, which has a large volume fraction of the brittle component, is not able to effectively resist wear and lead to premature spalling of large conglomerates of the composite coating. The coatings after laser melting in the melted areas have only 47% martensite of the total matrix volume, which makes it possible to effectively relax the arising stresses.

**Ключевые слова:** Лазерное оплавление, Термообработка, Композиционные покрытия, Пара трения, Износостойкость

**Keyword:** Laser melting, Heat treatment, Composite coating, Friction pair, Wear resistance

Введение

Актуальной задачей современной техники является увеличение ресурса долговечности деталей пар трения, работающих в условиях высоких динамических нагрузок и дефицита смазки [1-7]. Благодаря высокой твердости, красностойкости и сопротивлению изнашивания быстрорежущие стали остаются перспективным материалом не только для производства различных видов режущих инструментов, но и начинают использоваться для изготовления пуансонов, матриц, армирования валков прокатных станов и пар трения. Результаты многочисленных исследований, описанные в [5, 6], доказывают превосходство литых быстрорежущих сталей по сопротивлению истиранию над деформированными аналогичного химического состава и обработанными на одинаковую твердость.

При испытаниях на износ пары трения «покрытие сталь 10P6M5 – сталь ШХ15» была обнаружена область катастрофического износа (скорость 2,4 и 3,6 м/с и нагрузка 40 – 60 Н). Резкое увеличение износа происходит из-за роста температуры в трибоконтакте, что приводит к повышению пластичности матрицы и обратному  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращению. Это способствует разрушению сетки эвтектических карбидов  $M_6C$ .

Лазерное оплавление металлических материалов позволяет получать дисперсную неравновесную структуру в поверхностном объеме за счёт высокоскоростной направленной кристаллизации расплава [8]. Можно предположить, что поверхностное лазерное оплавление композиционных покрытий 10P6M5 в атмосфере воздуха позволит сформировать микрокомпозитную структуру в переплавленном объеме, подобную той, которая формируется в паре трения «покрытие сталь 10P6M5 – сталь ШХ15» в области катастрофического износа. Данные микроструктурные изменения должны исключить область катастрофического износа в паре трения.

#### Материалы и оборудование

Для поверхностного лазерного оплавления использовали упрочняющее покрытие на основе порошка быстрорежущей стали 10P6M5, полученное методом электронно-лучевой наплавки в вакууме [6]. Для лазерного оплавления (ЛО) образцов применялась лазерная установка «Blacklight» на основе неодимового лазера с ламповой накачкой и управляемым разрядом. Поверхность наплавки облучалась одиночными импульсами без перекрытия соседних точек.

Испытания на трение проводились на автоматизированном комплексе для трибосопрежений. В ходе статических испытаний использовали схему «колесо – две колодки» при ступенчатом повышении давления  $P$  (0.75; 1.5; 2.25 и 3 МПа) и скорости  $V = 0.5$  м/с и в условиях граничной смазки (вода). Контртелом служило колесо диаметром 62 мм и шириной 15 мм, изготовленное из закаленной шарикоподшипниковой стали ШХ15 (HRC 63...65). Поверхность покрытия половины образцов подвергалась точечному лазерному оплавлению в шахматном порядке. Доля оплавленной поверхности составляла ~40%. После приработки пары трения при каждом фиксированном давлении проводились четыре эксперимента с путем трения 2000 м. В качестве меры интенсивности изнашивания было использовано отношение объема материала, потерянного образцами в ходе испытания, к дистанции трения ( $\text{мм}^3/\text{км}$ ).

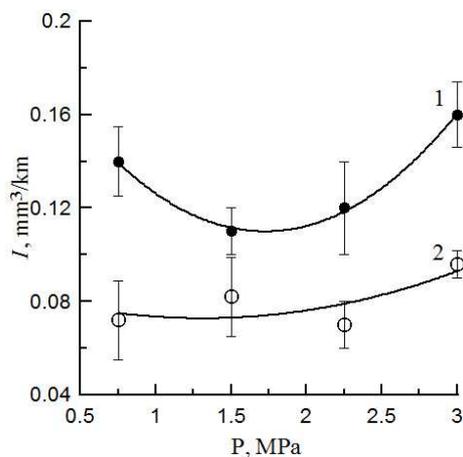


Рис. 1. Интенсивность изнашивания покрытия от давления в триботехническом контакте

Результаты и обсуждения. На рисунке 1 представлена зависимость интенсивности изнашивания исследуемых покрытий на основе стали 10P6M5 от давления в триботехническом контакте «колесо – две колодки» при скорости скольжения 0.5 м/с. Интенсивность изнашивания покрытия после ЛО (кривая 2) во всем интервале давлений на 40 – 60 % ниже, чем исходного покрытия (кривая 1). На рисунке 2 представлены ряд фото поверхностей трения исследуемых образцов и результаты профилометрии от этих поверхностей по линии перпендикулярной направлению скольжения. Анализ поверхностей скольжения свидетельствует о развитии абразивно-окислительном механизме изнашивания. Абразивными частицами служат продукты износа трущихся пар. Для исходного покрытия при давлениях 1.5 и 2.25 МПа наблюдается интенсивное намазывание продуктов износа на поверхность трения, рис. 2, д, е. Данное обстоятельство приводит к некоторому уменьшению интенсивности изнашивания для указанных давлений, (рисунок 1, кривая 1). Одновременно с этим начиная с давления 2.25 МПа на поверхности трения появляются отдельные вытянутые вдоль направления скольжения выкрашивания покрытия. При повышении давления до 3 МПа интенсивность выкрашивания повышается (рисунок 2ж), что резко увеличивает интенсивность изнашивания (кривая 1 на рисунок. 1). Глубина выкрашенных участков, согласно кривым профилометрии ~ 6мкм, (рисунок 2ж, з).

Для покрытий дополнительно обработанных ЛО как намазывания, так и выкрашивания целых конгломератов покрытия не наблюдается, (рисунок 2, в,г,и,к). Это сохраняет практически неизменной интенсивность изнашивания в рассматриваемом диапазоне давлений, (рисунок 1, кривая 2). По данным РФА поверхностей триботехнического контакта для обоих исследуемых покрытий доля мартенсита от общего объема матрицы практически не изменяется в исследуемом интервале давлений и сохраняется на уровне исходных образцов.

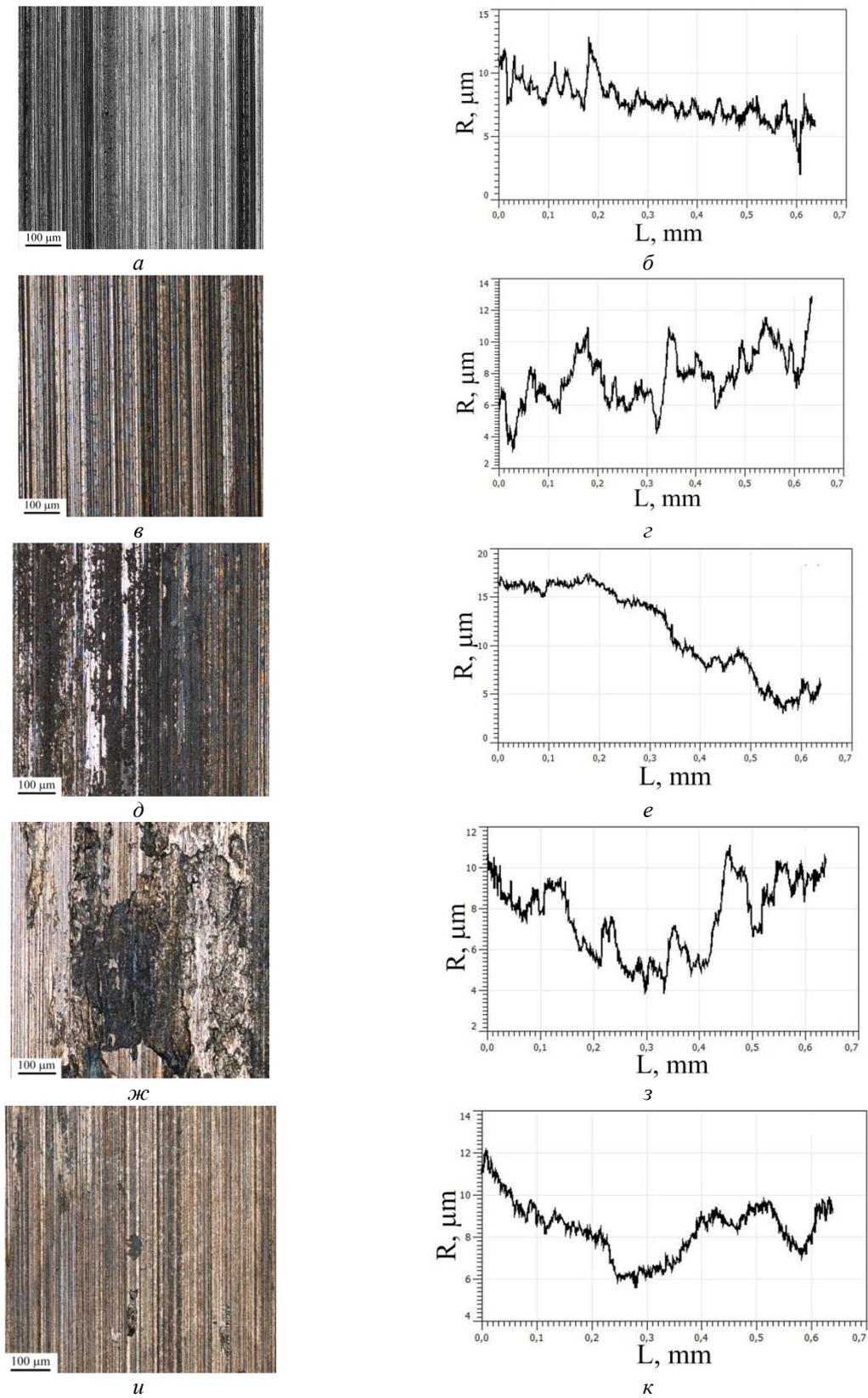


Рис. 2. Структура поверхностей исследуемых покрытий после износа и их профилометрия; а-г – 0,5 МПа, д,е – 1,5 МПа, ж-к – 3 МПа (а,б, д – з – исходное покрытие, в,г,и,к – покрытие после ЛО)

#### Выводы

Исходное покрытие, имеющее в своем составе большую объемную долю хрупкой составляющей (~90% мартенсита от общего объема матрицы и карбиды  $M_6C$  и  $VC$ ) не способно эффективно сопротивляться износу и приводят к преждевременному выкрашиванию больших конгломератов композиционного покрытия. Покрытия после ЛО в оплавленных участках имеют только 47% мартенсита от общего объема матрицы, что позволяет эффективно релаксировать возникающие напряжения в этих областях и, следовательно, сохранять малую и не изменяющуюся интенсивность изнашивания в рассматриваемом диапазоне давлений.

#### Список использованных источников:

1. Phan H. T., Tieu A. K., Zhu H. A study of abrasive wear on high speed steel surface in hot rolling by Discrete Element Method // Tribology International. – 2017. – № 110. – P. 66-76.
2. Xu Liu., Wei Shi., Xing Jian. Effects of carbon content and sliding ratio on wear behavior of high-vanadium high-speed steel (HVHSS) under high-stress rolling-sliding contact // Tribology International. – 2014. – № 70. – P. 34-41.
3. Jia G. W., Hua L., Mao H. J. The influence of surface layer microstructure evolution of M2 steel cold-ring rolling mandrel roller on fatigue crack initiation // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – № 187-188. – P. 562-565.
4. Mingiia W., Songmei Mu, Feifei S. Influence of Rare Earth Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Cast High-speed Steel Rolls // Journal of Rare Earth. – 2007. – № 25. – P. 490-494.
5. Chaus A. S., Hudakova M. Wear resistance of high-speed steels and cutting performance of tool related to structural factors // Wear. – 2009. Vol. 267. P. 1051-1055.
6. Gnyusov S.F., Ignatov A.A., Durakov V.G., Tarasov S. Yu. The effect of thermal cycling by electron-beam surfacing on structure and wear resistance of deposited M2 steel // Applied Surface Science. – 2012. – № 263. – P. 215-222.
7. Gnyusov S.F., Tarasov S. Yu. Structural phase states and heat aging of composite electron-beam clad coatings // Surface & Coatings Technology. – 2013. № 232. P. 775-783.
8. Ion, John. Laser Processing of Engineering Materials - Principles, Procedure and Industrial Application. Elsevier. – 2005. 585 p.

#### ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ СПОСОБ УПЛОТНЕНИЯ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

*С.А. Теслев, Е.П. Теслева, к. ф.- м. н., доц., Д.У. Досумкулов, студ.*

*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета,  
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

**Аннотация:** Рассматривается использование пневматического способа уплотнения микрокремнезема для получения продукции большой плотности и низкой слипаемости.

**Abstract:** The use of a pneumatic method for compacting microsilica to produce products of high density and low stickiness is considered.

**Ключевые слова:** производство ферросилиция, микрокремнезем, слипаемость микрокремнезема.

**Keyword:** production of ferrosilicon, microsilicon, adhesion of microsilicon.

В процессе производства ферросилиция, помимо основного формируется побочный продукт – микрокремнезем, который представляет собой мелкодисперсные частицы диоксида кремния ( $SiO_2$ ) [1-3]. Образование микрокремнезема происходит из основного компонента шихты – кварцита, который в процессе температурного воздействия в рудовосстановительной печи окисляется и вместе с печными газами отводится в газоочистной комплекс Печной газ с пылью проходит первую ступень очистки в циклонах, в которых происходит эффективное осаждение (улавливание) крупных посторонних включений, после чего чистый микрокремнезем осаждается в системе фильтров, поступает в установку уплотнения пыли и далее в установку упаковки.