

УДК 621.787

## УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБРАБОТКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

В. Н. МАЛЫШЕВ<sup>1</sup>, К. А. КОРЕПИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>[vmal@inbox.ru](mailto:vmal@inbox.ru), <sup>2</sup>[rediesel0866@yandex.ru](mailto:rediesel0866@yandex.ru)

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»

<sup>2</sup> ООО «GreenTechEnergy»

Поступила в редакцию 01.11.2019

**Аннотация.** Рассмотрен относительно новый метод упрочнения рабочих поверхностей, основанный на методе сварки трением с перемешиванием (FSW), который достаточно широко распространен на Западе и в меньшей степени в нашей стране. На примере упрочнения алюминиевого сплава Д16Т показано, что использование армирующих частиц карбида кремния позволяет повысить твердость упрочненной зоны на 25% и износостойкость в два раза по сравнению с исходной поверхностью. Отмечено, что существенное значение при этом методе имеют правильно выбранные режимы формирования, позволяющие получать качественный упрочненный слой с равномерным распределением армирующих частиц. Низкое энергопотребление и относительная простота метода могут способствовать более широкому применению его в промышленности.

**Ключевые слова:** обработка трением с перемешиванием; алюминиевые сплавы; упрочнение поверхности; армирующие частицы.

### ВВЕДЕНИЕ

Повреждения, связанные с эксплуатацией машин и механизмов, обусловлены преимущественно поверхностными процессами, такими как износ, усталость, коррозия или их комбинации. Для увеличения срока службы деталей важно иметь представление о трибологических свойствах рабочих поверхностей [1]. Т. W. Clyne и Р. J. Withers [2] продемонстрировали, что добавление армирующих частиц в металлическую матрицу резко увеличивает общую износостойкость деталей. Основные ограничения типовых методов упрочнения поверхностей, таких как порошковая металлургия, наплавка и литье, как указывают авторы [2], связаны с тем, что в них не достигается равномерное рассеивание армирующих частиц в металлическом поверхностном слое. Более современные методы для улучшения износостойкости и поверхностных характеристик,

такие как нанесение покрытий и обработка поверхности, описанные В. Bhushan [3], представляют методы создания металло-матричных композитов (ММК), усиленных частицами (особенно наночастицами), которые обеспечивают превосходные механические свойства (например, удельная прочность и высокая износостойкость). Тем не менее М. J. Zehetbauer и Y. T. Zhu [4] отмечают, что приобретенные свойства за счет использования частиц в композиционных материалах делают их менее однородными. С другой стороны, достижение равномерной дисперсии наночастиц в матрице является серьезной проблемой при изготовлении ММК. S. C. Tjong [5] объясняет это высоким соотношением поверхностного объема к объему наночастиц. Одним из вариантов преодоления этой проблемы является создание поверхностных нанокompозитных слоев (ПНС) и достижение оптимального

состояния, при котором и поверхностные, и объемные свойства материала полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям. J. Chen с соавторами [6] первые предположили, что создание слоя ММК на поверхности металлических частей является отличным способом для получения преимуществ превосходных поверхностных свойств ММК без какого-либо вредного влияния на объемные свойства.

Существует достаточно много способов формирования слоя ММК. Рассматриваемый в работе метод упрочнения обработкой трением с перемешиванием (ОТП/FSP) представляет собой относительно новый метод твердотельной обработки для формирования поверхностных нанокompозитов [7, 8]. G. Huang и Y. Shen [9] показали, что FSP также может быть использован для улучшения микроструктурных свойств поверхности материала, которые применимы к производству ММК. Более того, R. S. Mishra с соавторами [7] признали, что FSP помогает в увеличении дисперсии наночастиц и измельчению образовавшихся зерен при изготовлении. V. Sharma и др. [10] детально описали, что FSP – это метод, который основывается на сварке трением с перемешиванием (FSW). В процессе FSP в большинстве случаев не расходуется цилиндрический инструмент с определенной геометрией, состоящий из плеча и пина, погружаемого в поверхность основного материала. Вращательное движение инструмента генерирует тепловую энергию за счет трения между самим инструментом и основным материалом. По мере ввода тепловой энергии увеличивается температура зоны перемешивания (ЗП). При повышении температуры до 60–90% от температуры плавления материала значительно повышается пластфикация материала. Поэтому размягченный материал начинает течь от передней части пина к задней за счет вращательного движения в сочетании с поступательным движением самого инструмента. R. S. Mishra и соавторы [7] показали, что при добавлении наночастиц в мягкий материал во время FSP формируется улучшенный композиционный слой. Более того, R. Кароог с соавторами [11] сообщили о создании ультра-

мелкозернистой структуры (УМЗ) с помощью FSP. A. Chabok и K. Dehghani [12] также указывали в своей статье о формировании нанозернистой (НЗ) структуры, состоящей в основном из высокоугловых границ зерен после FSP. R. Z. Valiev и др. [13] показали, что FSP ускоряет рекристаллизацию в базовом материале, как в случае многих других методов тяжелой пластической деформации (ПД), которые не выделяют значительного количества тепла во время процесса. О важности учета трибологических характеристик при формировании упрочненных слоев отмечается в [14].

Следует отметить, что этот метод упрочнения поверхности приобрел значительный интерес в западных странах, в нашей же стране им только начинают заниматься и проявлять к нему повышенное внимание.

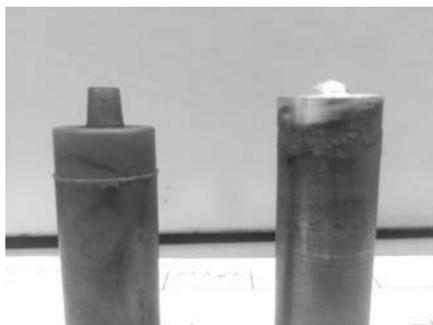
В связи с этим целью настоящей работы является подтверждение возможности упрочнения поверхности за счет создания композиционного материала методом обработки трением с перемешиванием и изучение некоторых механических и триботехнических характеристик полученных упрочненных слоев.

#### **МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ**

Для реализации метода использовали пластины из алюминиевого сплава Д16Т размерами 200×100×6 мм, в которых предварительно были сделаны поперечные канавки шириной 1,5–2 мм и глубиной от 1,5 до 5 мм (в зависимости от требуемого объема армирующих частиц), которые заполнялись армирующими частицами различного состава: оксида алюминия, карбида кремния, карбида титана, карбида молибдена, различной дисперсности. При этом в работе были использованы два способа закрепления армирующих частиц в канавках: посредством прохождения безпиновым инструментом при его вращении, когда он, захватывая верхний слой основного металла, закрывал канавку вместе с армирующими частицами, для предотвращения их вылета в процессе основного этапа обработки поверхности; второй способ закрепления ча-

стиц в канавке заключался в использовании связующего – поливинилового спирта, который при обработке испарялся из зоны контакта за счет температуры, развиваемой теплом от трения.

В качестве инструмента был выбран безпиновый инструмент – цилиндрический валик из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 16 мм. На основном этапе обработки использовался инструмент с пином размерами: высота от 1,5 до 5 мм, диаметр у основания пина – 6 мм, у вершины – 4 мм, плечом с диаметром 16 мм. Данный инструмент (рис. 1) выполнялся как из быстрорежущей стали Р6М5, так и комбинированный с рабочей частью из твердого сплава (ВК6) путем пайки с державкой.



**Рис. 1.** Основной инструмент из быстрорежущей стали (слева) и комбинированный из твердого сплава (справа)

Процесс упрочнения проводили на вертикально-фрезерном станке марки TW-mill.4.1 (DEG Germany) при нагрузке на инструмент 1–5 кН.

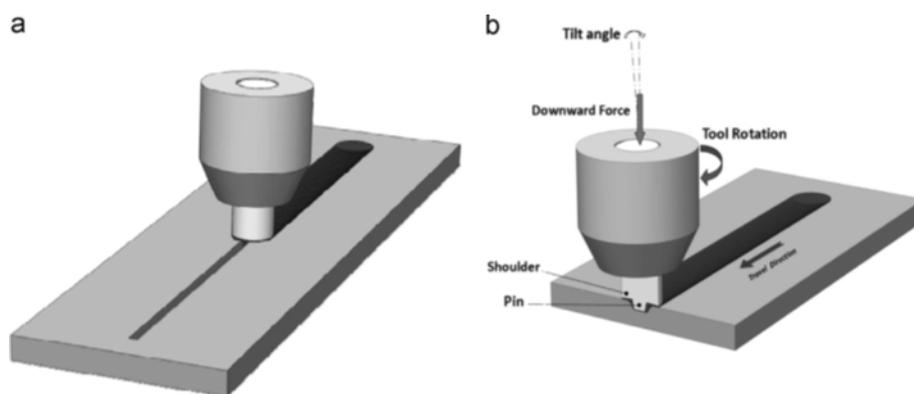
Типовой процесс упрочнения рассматриваемым методом происходит в два этапа [15] (рис. 2) – проходом безпиновым инструментом для закрытия канавки и собственно упрочнением инструментом с пином.

Правильно подобранные режимы всегда являются одним из основополагающих факторов влияния на результат любой технологии упрочнения. Основные параметры режимов упрочнения для ОТП:

- Нагрузка на инструмент, кН;
- Частота вращения инструмента вокруг своей оси, об/мин;
- Скорость подачи инструмента, мм/мин.

Структура полученного шва в данном случае меньше всего будет зависеть от нагрузки на инструмент. Изменение данного параметра не сильно влияет на качество полученной поверхности. Что касается остальных двух параметров, то они оказывают фундаментальное значение при формировании шва. Именно они определяют не только количество и тип возможных дефектов при их неправильном выборе, но и полученную структуру и выходящие из нее свойства формируемого композиционного материала. Из рекомендаций [16] следует, что выбор числа оборотов ниже 500 об/мин не рационален, так как в этом случае генерируемого тепла не достаточно для достижения необходимой пластичности металла. Что касается скорости перемещения инструмента вдоль шва, то в соответствии с [17] использование низких скоростей также не целесообразно в связи с появлением крупнозернистой структуры. Оптимальные режимы упрочнения будут, если использовать средние и высокие скорости вращения и средние и высокие скорости перемещения инструмента. На основании анализа тепловой нагрузки, обеспечивающей оптимальный нагрев до температуры размягчения основного материала порядка 480–490 °С (для алюминиевого сплава) были экспериментально подобраны параметры скоростей вращения и перемещения инструмента с соотношением 28–43, что согласуется с результатами исследований [18]. При этом выбранные параметры частоты вращения – 1250 об/мин и скорости перемещения инструмента – 27–38 мм/мин соответствуют соотношению скоростей, равному 35.

Для изучения макро- и микроструктуры полученных образцов упрочненных слоев использовали оптический, а также электронный микроскоп высокого разрешения HRSEM с энергодисперсионной приставкой, позволившей получить визуальное и качественно-полуколичественное подтверждение о наличии упрочняющих частиц в шлiffe. Твердость полученных слоев оценивали твердомером Виккерса при нагрузке 1 кг. При этом твердость определяли как поперек швов, так и на поверхности швов.



**Рис. 2.** Схема поэтапного упрочнения методом ОТП/FSP: *а* – закрытие канавки с армирующими частицами; *б* – проход инструментом с пином для упрочнения

Были проведены также испытания на трение и изнашивание упрочненных слоев на поршневом трибометре SRV с вращательной измерительной камерой по схеме трения шар–плоскость в соответствии с требованиями ASTM G133-02 [19]. Основные характеристики машины трения и параметры испытаний указаны в табл. 1.

Таблица 1

**Основные параметры условий испытаний на трение и изнашивание**

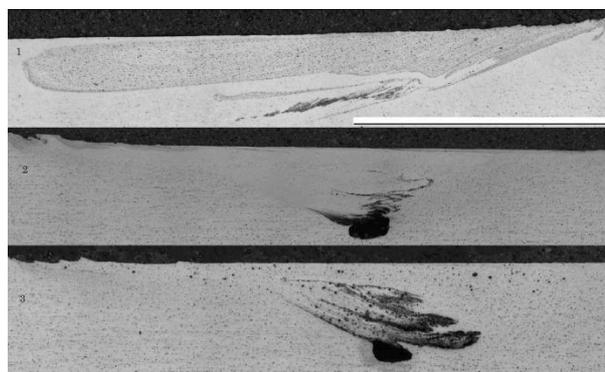
Нагрузка, Н	от 5 до 10
Частота, Гц	от 10 до 25
Продолжительность, мин	от 10 до 60
Используемые масла (среды)	1,5% EP; 3% EP; PAO8
Длина трека колебания, мм	от 1 до 2
Температуры испытаний, °С	от 20 до 100

При этом оценивались коэффициент трения и объемный износ упрочненного слоя. В качестве контртела использовался шарик из стали 100Cr6 (аналог подшипниковой стали ШХ15). Объемный износ оценивался на двухъядерном конфокальном интерферометрическом микроскопе Leica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе приведены результаты только по упрочнению армирующими частицами из SiC, которые имели наименьший размер частиц из исследованных (порядка 50 мкм) и наилучшие результаты. Для определения зон перемешивания были сделаны поперечные разрезы и подготовлены шлифы для металлографического анализа. На рис. 3 представлены поперечные разрезы упрочненной зоны с характерными зонами перемешивания.

Подтверждение наличия армирующих частиц в упрочненном слое осуществляли на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения HRSEM. В анализируемых шлифах, даже при наличии некоторых дефектов (неполного заполнения канавки), упрочняющая область с армирующими частицами видна достаточно четко и объем ее занимает 22–24% от зоны перемешивания.



**Рис. 3.** Зоны перемешивания упрочненной поверхности

Использование энергодисперсионной приставки к сканирующему микроскопу, способной идентифицировать химические элементы в исследуемой области, позволило выявить наличие армирующих частиц в составе анализируемого объема упрочнения (рис. 4). На энергетических диаграммах четко выявлялись пики, соответствующие элементам упрочняющих частиц (Si из SiC). Кроме того, наблюдалось значительное измельчение зерна основного материала, что также способствовало повышению твердости и прочностных характеристик упрочняемой зоны.

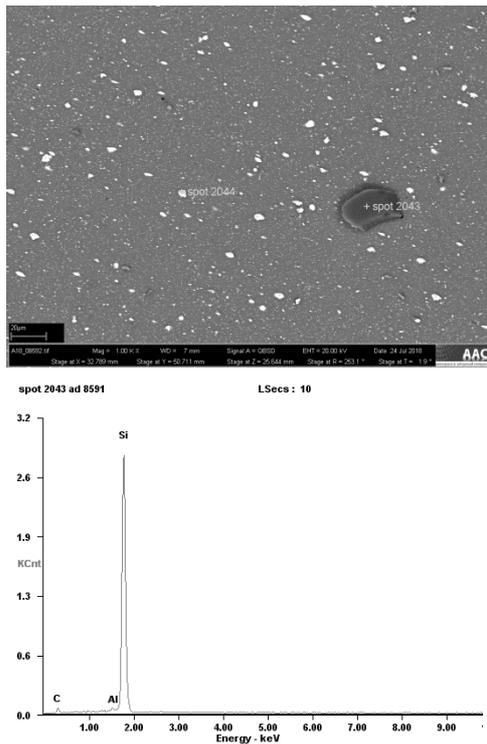


Рис. 4. Упрочненная зона с армирующими частицами карбида кремния

Оценку эффекта упрочнения наиболее просто осуществить, измеряя твердость поверхности. Измерения проводили с шагом 0,5 мм, что позволило получить картину распределения твердости по поперечному разрезу (рис. 5) упрочненной зоны.

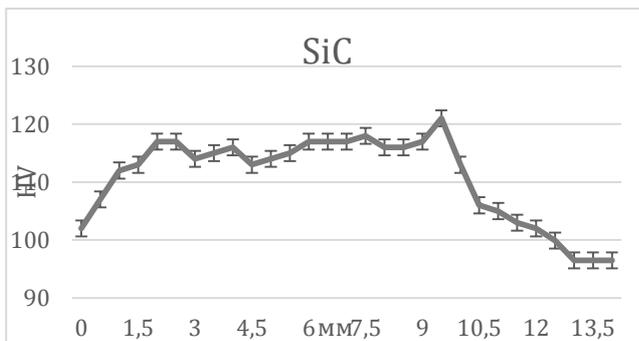


Рис. 5. График изменения твердости в поперечном сечении упрочненной зоны с армирующими частицами из карбида кремния

Для оценки триботехнических характеристик использовалась машина трения SRV с интегрированной компьютерной системой, которая ежесекундно вычисляла текущий коэффициент трения (рис. 6).

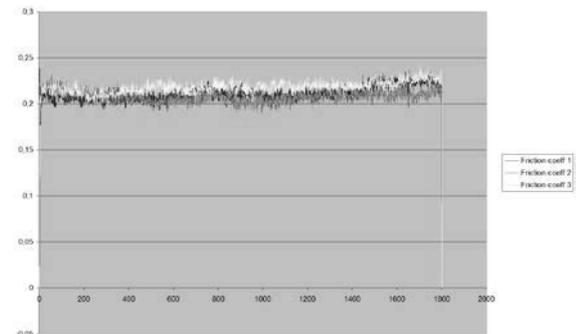


Рис. 6. Изменение коэффициента трения во времени для упрочненной зоны с частицами SiC

Наличие в зоне трения армирующих частиц карбида кремния подтверждали также на сканирующем микроскопе HRSEM, анализируя след дорожки трения (рис. 7). На диаграмме четко выявляется пик, соответствующий кремнию, что подтверждает присутствие армирующих частиц карбида кремния в упрочненной зоне.

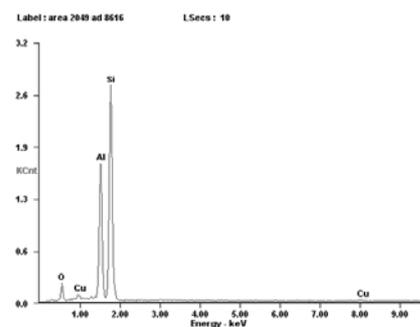
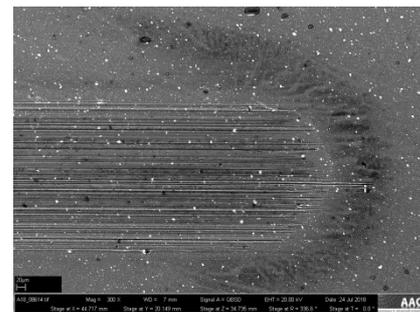
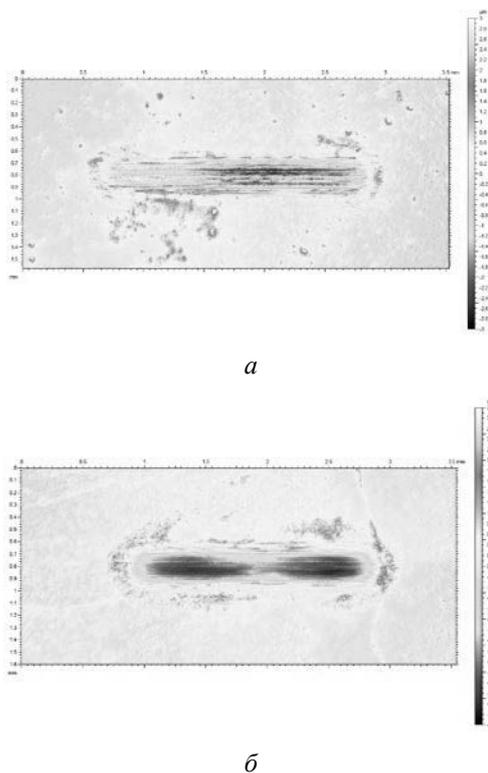


Рис. 7. След износа на образце алюминиевого сплава с армирующими частицами SiC

Провели также оценку объемного износа на двухъядерном конфокальном интерферометрическом микроскопе Leica в сравнении с образцом из алюминиевого сплава без упрочняющей обработки (рис. 8).



**Рис. 8.** Объемный износ упрочненной зоны с армирующими частицами SiC (*а*) и неупрочненного алюминиевого сплава (*б*)

Результаты полученных исследований позволяют утверждать, что обработка методом трения с перемешиванием обеспечивает упрочнение рабочей поверхности, что подтверждается данными измерения твердости и износа зоны упрочнения. Рис. 5 показывает, что увеличение твердости, по сравнению с исходной поверхностью, составляет порядка 25%. Подсчитанные результаты объемного износа также указывают, что упрочненная зона в два раза более износостойка, чем поверхность без обработки (объемный износ 507712 и 1017518 мкм<sup>3</sup> соответственно). На рис. 8, *б* явно видно, что износ неупрочненной поверхности намного выше, чем упрочненной.

Коэффициент трения довольно стабилен и не подвержен каким-либо изменениям в пределах периода испытаний.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований сравнительно нового метода упрочнения рабочих поверхностей обработкой трением с перемешиванием (FSP) можно сделать следующие выводы:

- среднее увеличение твердости поверхности составляет 20–25%;
- объемный износ упрочненной зоны уменьшается до двух раз;
- расход энергии при данном методе упрочнения сокращается многократно относительно электродуговой наплавки;
- метод позволяет упрочнять избирательные (локальные) участки поверхности, оставляя без изменений механические свойства базового материала.

*Авторы выражают глубокую признательность руководству Австрийского центра компетенций в трибологии – AC<sup>2</sup>T Research GmbH за предоставленную возможность проведения части исследований на оборудовании центра.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Effect** of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel / Z. B. Wang, et. al. // *Materials Science and Engineering A*. 2003. Vol. 352, No. 1-2. Pp. 144-149. [ Z. B. Wang, et. al., “ **Effect** of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel”, in *Materials Science and Engineering A*, vol. 352, no. 1-2, pp.144-149, 2003. ]
2. **Clyne T. W., Withers P. J.** An Introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge University Press, 1995.
3. **Bhushan B.** Principles and applications of tribology. John Wiley & Sons, 2013. 1008 p.
4. **Zehetbauer M. J., Zhu Y. T.** Bulk Nanostructured Materials. Wiley, 2009.
5. **Tjong S. C.** Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties // *Advanced Engineering Materials*. 2007. Vol. 9 (8). Pp. 639-652. [ S. C. Tjong, “Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties”, in *Advanced Engineering Materials*, vol. 9 (8), pp. 639-652, 2007. ]
6. **Chen J., Hao C., Zhang J.** Fabrication of 3D-SiC network reinforced aluminum–matrix composites by pressureless infiltration // *Materials Letters*. 2006. Vol. 60 (20). Pp. 2489-2492. [ J. Chen, C. Hao, J. Zhang, “Fabrication of 3D-SiC network reinforced aluminum–matrix composites by pressureless infiltration”, in *Materials Letters*, vol. 60 (20), pp. 2489-2492, 2006. ]
7. **Mishra R. S., Ma Z. Y., Charit I.** Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite // *Materials Science and Engineering A*. 2003. Vol. 341, No. 1-2. Pp. 307-310. [ R. S. Mishra, Z. Y. Ma, I. Charit, “Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite”, in *Materials Science and Engineering A*, vol. 341, no. 1-2, pp. 307-310, 2003. ]
8. **Microstructure** and corrosion resistance of laser cladding and friction stir processing hybrid modification Al-Si coatings on AZ31B / F. Liu, et. al. // *Vacuum*. 2016. Vol. 133. Pp. 31-37. [ F. Liu, et. al., “Microstructure and corrosion resistance of laser cladding and friction stir processing hybrid modification Al-Si coatings on AZ31B”, in *Vacuum*, vol. 133, pp. 31-37, 2016. ]

9. **Huang G., Shen Y.** The effects of processing environments on the microstructure and mechanical properties of the Ti/5083Al composites produced by friction stir processing // *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 30. Pp. 361-373. [ G. Huang, Y. Shen, "The effects of processing environments on the microstructure and mechanical properties of the Ti/5083Al composites produced by friction stir processing", in *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 30, pp. 361-373, 2017. ]

10. Sharma V., Prakash U., Kumar B. M. Surface composites by friction stir processing: A review // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 224. Pp. 117-134. [ V. Sharma, U. Prakash, B. M. Kumar, "Surface composites by friction stir processing: A review", in *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 224, pp. 117-134, 2015. ]

11. **Influence** of fraction of high angle boundaries on the mechanical behavior of an ultrafine grained Al-Mg alloy / R. Kapoor, et. al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527 (20). Pp. 5246-5254. [ R. Kapoor, et. al., "Influence of fraction of high angle boundaries on the mechanical behavior of an ultrafine grained Al-Mg alloy", in *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527 (20), pp. 5246-5254, 2010. ]

12. **Chabok A., Dehghani K.** Formation of nanograin in IF steels by friction stir processing // *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 528, No. 1. Pp. 309-313. [ A. Chabok, K. Dehghani, "Formation of nanograin in IF steels by friction stir processing", in *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 1, pp. 309-313, 2010. ]

13. **Valiev R. Z., Korznikov A. V., Mulyukov R. R.** Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation // *Materials Science and Engineering: A*. 1993. Vol. 168 (2). Pp. 141-148. [ R. Z. Valiev, A. V. Korznikov, R. R. Mulyukov, "Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation", in *Materials Science and Engineering: A*, vol. 168 (2), pp. 141-148, 1993. ]

14. **Malyshev V. N.** Tribological aspects in friction stir welding and processing / M. K. Besharati-Givi and P. Asadi (Ed.) // Chapter 8 in book "Advances in Friction Stir Welding and Processing". Woodhead Publishing Ltd., 2014. Pp.329-386. DOI:10.1533/9780857094551.329.

15. **Fabrication** of metal matrix composites by friction stir processing with different Particles and processing parameters / S. Sahraeinejad, et. al. // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 626. Pp. 505-513. [ S. Sahraeinejad, et. al., "Fabrication of metal matrix composites by friction stir processing with different Particles and processing parameters", in *Materials Science and Engineering: A*, vol. 626, pp. 505-513, 2015. ]

16. **Uzun Huseyin.** Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite // *Materials & Design*. Elsevier. 2007. Vol. 28, No. 5. Pp. 1440-1446. [ Uzun Huseyi, "Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite", in *Materials & Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1440-1446, 2007. ]

17. **Arora H. S., Singh H. and Dhindaw B. K.** Composite fabrication using friction stir processing – a review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. London. 2012. No. 61. Pp. 1043-1055. [ H. S. Arora, H. Singh and B. K. Dhindaw, "Composite fabrication using friction stir processing – a review", in *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 61, pp. 1043-1055, 2012. ]

18. **Frigaard O., Grong O., Midling O. T.** A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. Vol. 32,

no. 5. Pp. 1189-1200. [ O. Frigaard, O. Grong, O. T. Midling, "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys", in *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 32, no. 5, pp. 1189-1200, 2001. ]

19. **ASTM G 133-02.** Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. ASTM International, 2002.

#### ОБ АВТОРАХ

**МАЛЫШЕВ Владимир Николаевич**, проф. кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования. Дипл. инженер-механик (УНИ, 1976), канд. техн. наук по специальности 05.02.04 (МИНХиГП, 1984), д-р.техн. наук по специальностям 05.02.04 и 05.02.01 (РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 1999). Область научных интересов – трибология, керамические покрытия на металлах, деформационное упрочнение

**КОРЕПИН Константин Алексеевич**, сервисный инженер, Дипл.магистра техники и технологии (РГУ нефти и газа, 2019), исследования в области деформационного упрочнения

#### METADATA

**Title:** Hardening of working surfaces by friction stir processing.

**Authors:** V. N. Malyshev<sup>1</sup>, K. A. Korepin<sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> National university of Oil and Gas "Gubkin University"

<sup>2</sup> GreenTechEnergy, Ltd

**E-mail:** <sup>1</sup>vmal@inbox.ru, <sup>2</sup>reddiesel0866@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 26-32, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper discusses a relatively new method of hardening work surfaces, based on the method of friction stir welding (FSW), which is quite widespread in the West and to a lesser extent in our country. On the example of hardening of the aluminum alloy D16T, it is shown that the use of reinforcing particles of silicon carbide can increase the hardness of the strengthened zone by 25% and wear resistance by two times, compared with the initial surface. It is noted that correctly selected formation modes are essential for this method, allowing one to obtain a high-quality hardened layer with a uniform distribution of reinforcing particles. Low energy consumption and the relative simplicity of the method can contribute to its wider application in industry.

**Key words:** friction stir processing; aluminum alloys; strengthening of surface; reinforcing particles.

**About authors:**

**MALYSHEV, Vladimir Nikolaevich**, Prof. of Department Tribology and Repair Technology of Oil and Gas Equipment. Dipl. mechanic Engineer- (UNI, 1976), PhD on 05.02.04 (Moscow Institute of Petrochemical Industry named after I.M.Gubkin, 1984), Dr. of Techn. Sci. on 05.02.04 and 05.02.01 (Gubkin RGU, 1999). Field of science interests – tribology, ceramic coatings on metals, deformational hardening

**KOREPIN, Konstantin Alexeevich**, service eng. Dipl. Master of Technics & Technology (Gubkin RGU, 2019), deformational hardening research.