

УДК 621.77.016.3
DOI: 10.12737/24547

А.Г. Суслов, д.т.н.
(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, 115409, Каширское шоссе, 31),
М.Г. Шалыгин, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, Бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: mootechmash@mail.ru, migshalysin@yandex.ru

Научно-технологическая технология повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородных средах

В статье изложен научный подход к разработке комбинированной технологии рабочих поверхностей трения деталей, обеспечивающий повышение их износостойкости в водородной среде. Приведены результаты сравнительных испытаний на износ для различных технологий повышения износостойкости.

Ключевые слова: термическая обработка; высоковакуумный отжиг; ионная имплантация; водородное изнашивание; комбинированная обработка; водород.

A.G. Suslov, D. Eng.,
(National Research Nuclear University "MEPI", 31, Kashirskoye Highway, 115409, Moscow)
M.G. Shalygin, Can. Eng.
(Bryansk State Technical University, 7, 50-Years of October Avenue, Bryansk 241035)

High technology of wear-resistance increase in friction surfaces of machinery operating in hydrogen environment

In the paper there is considered a problem of wear-resistance increase in parts operating in hydrogen environment. The dependence of friction surface wear taking into account their sub-roughness and hydrogen existence is shown. A technology for a friction couple wear-resistance increase is offered including surface layer granularity decrease, the reduction of hydrogen content in an inter-grain space and the introduction in the structure of parts surface layers the elements allowing filling up an inter-grain space. The results of comparative wear tests for different technologies for wear-resistance increase are shown. It is defined that the technology offered allows increasing wear-resistance in friction surfaces in machine parts. A method for account of hydrogen existence in an inter-grain space is offered and a reasonable method for obtaining a numerical value of a factor taking into account hydrogen presence used for theoretical computations.

Keywords: thermal treatment; high-vacuum annealing; ionic implantation; hydrogen wear; combined treatment; hydrogen.

В большинстве случаев, наряду с другими видами изнашивания [1] в процессе изнашивания деталей машин при трении активное участие принимает водород. Водород присутствует, как в смазывающих материалах, так и в окружающей среде, а также в самих трущихся деталях – биографический водород. Однако когда детали пар трения работают в

водородных средах, зачастую, водородное изнашивание становится основной причиной выхода из строя узлов трения.

Исследованию воздействия водородного изнашивания на стали посвящено большое количество работ. В научной литературе неоднократно приводятся исследования, посвященные повышению водородной износостой-

кости стальных деталей при трении.

Принято считать, что износ поверхностей трения осуществляется в следствие совместного воздействия молекулярной и деформационной составляющих на уровне шероховатости [2]. Однако как в этой работе, так и в более ранних работах не учитывалось наличие на поверхностях трения субшероховатости.

Удельный износ поверхностей трения с учетом их субшероховатости и наличия водорода можно определить из выражения:

$$I = (u + i)h_2, \quad (1)$$

где u – деформационная составляющая удельного износа; i – адгезионная составляющая удельного износа; h_2 – коэффициент, учитывающий наличие водорода.

В связи с тем, что водород при трении взаимодействует с металлами на наноуровне, целесообразно рассматривать водородное изнашивание на уровне субшероховатости. На уровне субшероховатости, при расчетах на трение и износ контактирующих поверхностей, будут возникать как пластические, так и упругие деформации, а в некоторых случаях будет иметь место микрорезание выступов субшероховатости:

$$u = u_{пл} + u_{упр} + u_{ср}.$$

Выражения для расчета пластической упругой составляющей удельного износа, а также среза приведены в работе [3]. Глубина внедрения при деформации субшероховатости определяется по зависимостям, предложенным в работах отечественных и зарубежных ученых, для пластического контакта [3], для упругого контакта [4]. Адгезионная составляющая удельного износа на уровне субшероховатости поверхностей трения определяется из выражения:

$$i = \frac{V_a}{A_r L},$$

где V_a – объем, отделяемый с поверхности материала при адгезионном износе; A_r – фактическая площадь контакта; L – путь трения.

Выражение для расчета объема, отделяемого при адгезионном износе, приведено в работе [5]. В составляющую выражения для объема, отделяемого при адгезионном износе, входит такой параметр, как шаг субшероховатости. В то же время, в результате проведенного регрессионного анализа [6] получено уравнение связи шага субшероховатости и размера зерен материала:

$$L_3 = 27,4509 + 0,3689 \cdot e^{0,114113 \cdot S_{mc}}. \quad (2)$$

Уравнение (2) объясняет 56,5 % вариации L_3 (индекс корреляции $R_{SL} = 0,7729$).

Анализ приведенных выше уравнений позволяет сформулировать технологический подход к повышению износостойкости поверхностей трения, работающих в водородной среде. А именно – уменьшать зернистость поверхностного слоя и содержание водорода в межзеренном пространстве.

В качестве такой технологии предлагается:

1. Для уменьшения зернистости поверхностного слоя целесообразно применять термическую обработку (ТО) с образованием мелкозернистой структуры.

2. Осуществлять обезводороживание поверхностного слоя.

3. Заполнять межзеренное пространство другим материалом, который препятствует проникновению водорода в это пространство при эксплуатации в водородной среде.

Для проведения обезводороживания образцов (ВО) была изготовлена установка (рис. 1), функциональная схема которой была предложена Д.Н. Гаркуновым [1].

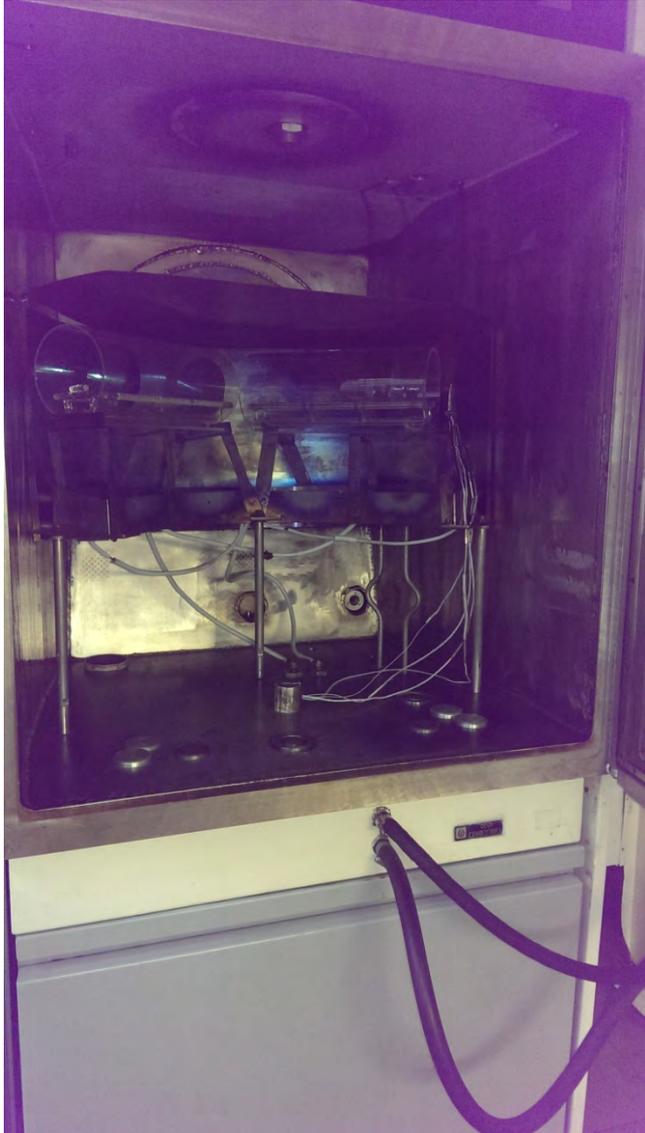
Установка содержит корпус 1 (рис. 1, а); электропечь, содержащую ТЭНы 2 и теплоизоляционную обшивку 3. В корпусе 1 расположена вакуумная система, состоящая из вакуумной камеры 4, спирального безмасленного насоса 5, турбомолекулярного насоса 6, затвора вакуумного прогревочного 7, клапанов вакуумных ручных 8 (рис. 1, в), вакуумметра 9, датчика давления 10 (рис. 1, б), пневмопровода откачки 11. В камеру 4 помещаются образцы 12. Камера имеет крышку 13, которая поджимается к камере 4 винтами 14. Установка имеет блок управления 15 и рукоятку сброса давления 16.

Обезводороживание образцов проводилось по следующей технологии. Перед помещением в камеру образцы промывались бензином и четыреххлористым углеродом. После помещение образцов в камеру установки, камера герметизировалась и проводилась откачка воздуха из камеры до давления $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па. При достижении вакуума в $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па включалась электропечь, и камера разогревалась до температуры 523 К. О начале десорбции водорода из образцов судили по падению давления в камере. При достижении вакуума $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па при температуре 523 К электропечь выключалась, и при достижении температуры в камере в 293 К в нее запускался воздух.

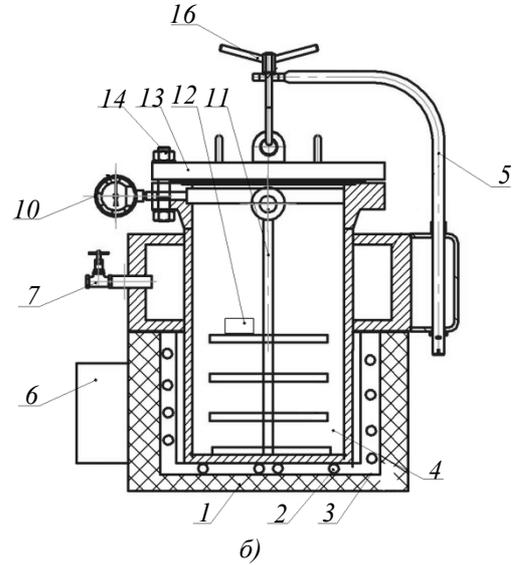
Приведенная технология обезводорожива-

ния снижает концентрацию водорода в поверхностном слое материала. Однако, согласно [7], через некоторое время в условиях покоя концентрация водорода восстанавливается вследствие его десорбции из глубины материала в поверхностный слой. По этой причине

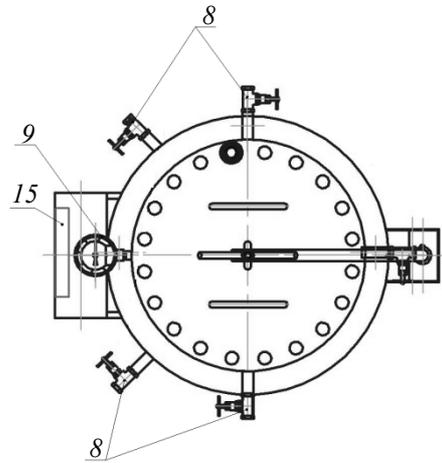
необходимо заполнить образовавшиеся при десорбции водорода «пустоты» до восстановления его концентрации во всем объеме образца. Таким образом, необходима комбинированная технологическая обработка (КО) поверхностей трения деталей машин.



а)



б)



в)

Рис. 1. Установка для термического наводороживания и высоковакуумного обезводороживания деталей машин:

а – общий вид; б – главный вид; в – вид сверху

С целью повышения износостойкости обезводороженные образцы были подвержены ионной имплантации (ИМ). Ионное имплантирование осуществлялось на установке Везувий 3-М (рис. 2).

В качестве имплантируемого элемента был выбран кремний. Как известно, при отливке сталей кремний не образует карбидов, он растворяется в мартенсите и замедляет распад ле-

гированного мартенсита. Таким образом, создание карбидов кремния в готовых стальных деталях возможно только технологическими методами.

Внедрение ионов кремния в структуру кристаллической решетки после обезводороживания потенциально позволяет не только создать карбиды в поверхностном слое, но и дает возможность ионам кремния занять вакансии, об-

разовавшиеся после десорбции водорода. Ионная имплантация проводилась с энергией ионов $E = 400$ кэВ; плотностью тока ионного пучка $j = 60$ мкА/см²; дозой облучения $Q = 1000$ мкКул /см²; углом наклона ионного пучка 7° .



Рис. 2. Камера загрузки установки ионного легирования «Везувий-3М»

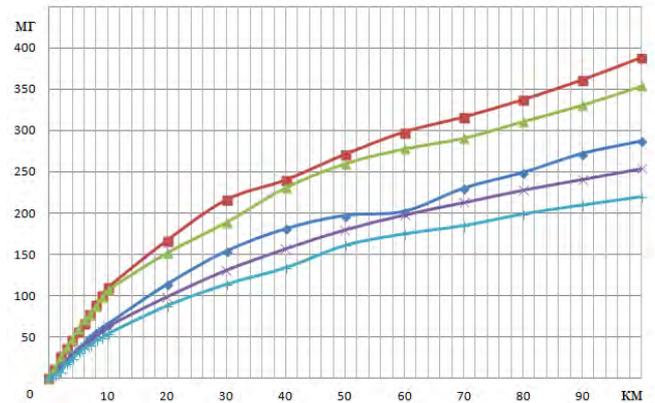
Одной из причин эффективности предложенной технологии может являться то, что при обезводороживании в поверхностном слое образца снижается количество биографического водорода. В то же время при ионной имплантации поверхностный слой насыщается ионами кремния, часть которых может образовать карбиды в поверхностном слое, часть ионов может заполнить собой дефекты кристаллической решетки, такие как вакансии и дислокации, часть ионов может оседать в междоузлиях решетки, создавая твердый раствор внедрения.

Все это может препятствовать атомарному водороду, выделившемуся из смазочного материала или водородной среды, интенсивно проникать в поверхностный слой и концентрироваться в дефектах и, как следствие, приводить к водородному изнашиванию и водородному охрупчиванию деталей.

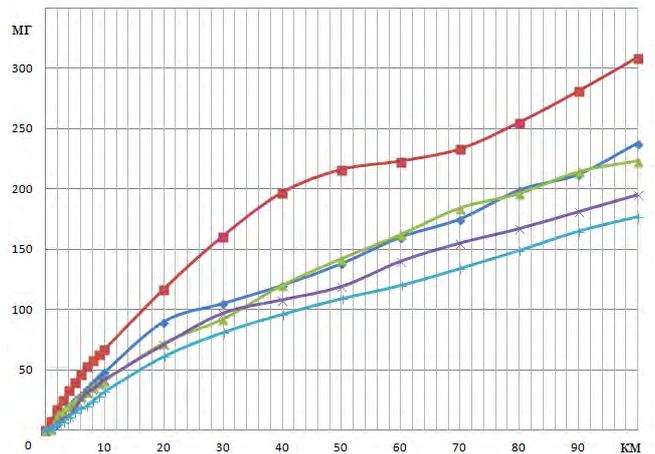
Образцы после ТО, ТО + ВО, ТО + ИМ и комбинированной обработки были испытаны на износ. Все образцы были подвержены термической обработке. В качестве контртела выступала термически обработанная сталь 40х с твердостью и шероховатостью идентичной испытываемому образцу. Нагрузка составляла $P = 50$ Н. В процессе испытаний измеряли износ по массе каждые 1000 м. За данный путь трения образец совершал 12,7 цикла.

Испытания проводились на машине трения при наличии смазочного материала, в качестве которого выступало минеральное масло Ravenol 20w-50. Температура в зоне трения составляла $34,3^\circ\text{C}$. Результаты испытаний приве-

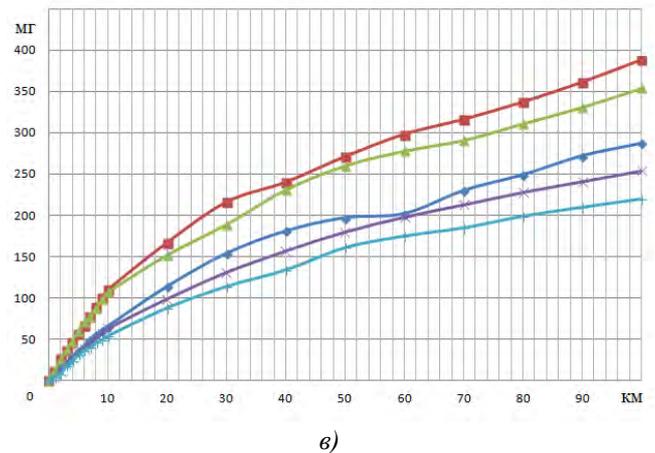
дены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что обезводороживание уменьшает износ по сравнению с термически обработанной сталью, при этом, износ после ТО+ИМ сопоставим с износом при ТО+ВО. Меньший износ имеют образцы после комбинированной обработки.



а)



б)



в)

Рис. 3. Износ по массе стали 40х: (■ - ТО; ◆ - ТО+ВО; ▲ - ТО+ИМ; * - КО); а - Ra 0,2; б - Ra 0,4; в - Ra 1,6

Наиболее износостойким был образец с ше-

роховатостью Ra 0,2 после комбинированной обработки, имеющий весовой износ 185 мг. В результате дисперсионного анализа экспериментальных данных износа установлено, что материал, обработка и шероховатость значимо влияют на износ. Также анализ показал, что образцы, подверженные ТО+ВО и ТО+ИМ сопоставимы. Таким образом, на результат износа данные виды обработки влияют одинаково.

Из рис. 3 видно, что потеря массы образца после комбинированной обработки в 1,3–1,5 раза меньше, чем потеря массы образца после термической обработки и в 1,1–1,2 раза меньше чем после ТО+ВО. Анализируя результаты испытаний образцов после ТО и ТО+ВО можно попытаться эмпирически определить коэффициент, учитывающий влияние водородного изнашивания на износ в целом и водорода в частности (1).

Его можно определить как отношение потери массы образца после обезводороживания к потере массы образца до обезводороживания на каждом участке пути трения (табл. 1).

1. Отношение износа образцов после ТО+ВО к образцам после ТО

Путь трения · 10 ³ , м	Сталь 40x		
	Шероховатость Ra , мкм		
	0,2	0,4	1,6
1	1,142	8	1,090
2	1,181	3,6	1,529
3	1,230	1,923	1,636
4	1,058	1,65	1,586
5	0,857	1,6	1,555
6	0,958	1,620	1,595
7	0,851	1,558	1,591
8	0,9	1,487	1,618
9	0,9	1,431	1,639
10	0,909	1,395	1,666
20	1,072	1,3	1,464
30	1,060	1,533	1,402
40	1,086	1,641	1,325
50	1,062	1,565	1,375
60	1,087	1,393	1,475
70	1,092	1,331	1,373
80	1,086	1,281	1,353
90	1,083	1,325	1,327
100	1,093	1,298	1,351

Тогда, можно прийти к выводу, что для стали 40x коэффициент водорода находится в пределах 0,85...1,92. На рис. 4 приведена диаграмма размаха полученных коэффициентов с указанием доверительных интервалов. Значения коэффициента 3,6 и 8 для шероховатости Ra 0,4, в результате анализа погрешностей, оценены как промахи. Среднее значение коэффициента для стали 40x составляет 1,333.

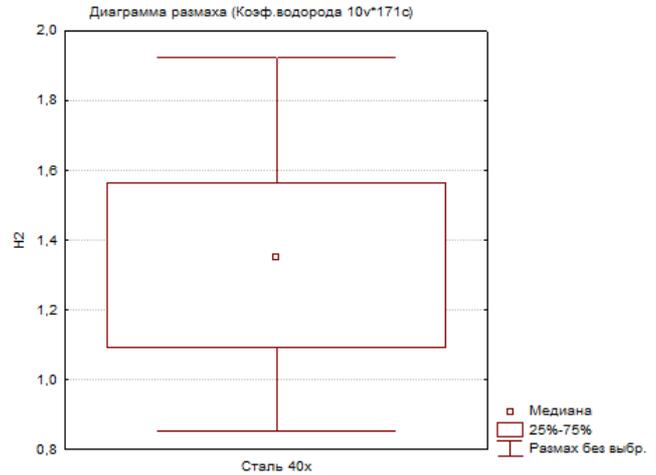


Рис. 4. Диаграмма размаха коэффициента водорода

Таким образом, предложенная технология позволяет повысить износостойкость поверхностей трения деталей машин, работающих в водородной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаркунов, Д.Н., Мельников, Э.Л., Гаврилюк, В.С. Триботехника. – М.: Кнорус, 2011. – 408с.
2. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320с.
3. Суслов А.Г., Богомолов Д.Ю., Шалыгин М.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. №4. С. 7-10.
4. Tian H., Zhao C., Zhu D. and Qin H. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces. Int. J. of modeling and Optimization, Vol. 2, No. 3, 2012.
5. Suslov A.G. and Shalygin M.G. The interrelation of the surface subroughness of martensitic steels with their granularity the quality of mechanical processing. AIP Conf. Proc. 1785, 040085 (2016).
6. Суслов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости) поверхности деталей и зернистости материала // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 11(53). С. 3–7.
7. Защита от водородного износа в узлах трения / Колл. авт.; под. ред. А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 135.

REFERENCES

1. Garkunov, D.N., Melnikov, E.L., Gavriluk, V.S. *Tribotechnics*. – M.: Knorus, 2011. – pp. 408.
2. Suslov, A.G. *Surface Layer Quality in Machine Parts*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
3. Suslov, A.G., Bogomolov D.Yu., Shalygin M.G. Fatigue wear of friction surface on sub-roughness level // *Friction and Lubrication in Machinery*. 2015. №4. pp. 7-10.
4. Tian H., Zhao C., Zhu D. and Qin H. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces. *Int. J. of modeling and Optimization*, Vol. 2, No. 3, 2012.
5. Suslov A.G. and Shalygin M.G. The interrelation of the surface subroughness of martensitic steels with their granularity the quality of mechanical processing. *AIP Conf. Proc.* 1785, 040085 (2016).
6. Syslov A.G., Poroshin V.V., Shalygin M.G., Kuznetsov S.V. Interconnection of nano-roughness (sub-roughness of parts surfaces and material granularity) // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. № 11(53). pp. 3–7.
7. *Protection against Hydrogen Wear in Friction Units* / Authors Group; under the editorship A.A. Polyakova. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 135.

Рецензент д.т.н. В.И. Бутенко

УДК 621.9.047
DOI: 10.12737/24548

В.П. Смоленцев, д.т.н.,
С.В. Сафонов, к.п.н.
(Воронежский государственный технический университет,
394026, Воронеж, Московский пр., 14)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Способы и технологии модификации поверхностного слоя металлических изделий

Показана возможность проектирования комбинированных технологических процессов, обеспечивающих предельно возможные критериально оцениваемые эксплуатационные показатели изделий. Приведены научно обоснованные способы выбора и использования ранее созданных технологий, методы разработки перспективных видов покрытий, средств модификации поверхностного слоя и изменения толщины покрытий с приданием им нужных эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: способы обработки; качество поверхностного слоя; модификация; моделирование; технологические процессы; эксплуатационные показатели.

V.P. Smolentsev, D. Eng.,
S.V. Safonov, Can. P.
(Voronezh State Technical University, 14, Moscovsky Avenue, Voronezh, 394026)

Methods and technologies for surface layer modification in metal products

In the work it is shown that the design of combined technological processes ensuring the maximum possible operating characteristics of products assessed in a criterion way is possible. The science-based methods of choice and use of technologies created earlier, methods for the development of promising coating types, means for the modification of a surface layer and thickness changes of coatings with operating characteristics required are shown. The possibilities are considered for the creation of new methods realizing operating indices the fulfillment of which is impossible at common technologies. The well-known researches have shown that at the operation of science intensive products the mechanical characteristics including fatigue material resistance depend to a great extent upon a state and properties of a surface layer that is why there is offered a substantiated choice and design of technological processes for manufacturing products with properties corresponding most completely to operation conditions.

Keywords: processing method; surface layer quality; modification; modeling; technological processes; operation indices.