УДК 669.14: 621.787+621.926.3

ВЛИЯНИЕ ВИДА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ*

В.И.БОЛОБОВ, *д-р техн. наук, профессор, Boloboff@mail.ru*
С.А.ЧУПИН, *ассистент, Staseg-88@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

На примере стали 110Г13Л как материала зубьев ковшей экскаваторов показано, что механическое упрочнение является эффективным средством повышения (до 10 раз) износостойкости деталей, контактирующих с абразивными средами, например мрамором, уступающим данной стали в состоянии наклепа по твердости. В случае изнашивания по породам (гранит, габбро) с твердостью, превышающей твердость стали, влияние наклепа практически не сказывается. Обнаружено, что высокотемпературная термомеханическая обработка стали 35ХГСА как материала державок поворотных резцов (деформация при 900 °С, закалка в воде, отпуск при 230 °С) приводит к существенному повышению твердости (на 23 %) и износостойкости (на 38 %) по сравнению с типовой термической обработкой, используемой при изготовлении резцов на заводах-изготовителях.

***Ключевые слова*:** материалы рабочего инструмента, наклеп, термомеханическая обработка, горные породы, скорость изнашивания.

Механическая и термомеханическая упрочняющие обработки являются эффективным средством повышения малоцикловой и многоцикловой усталости деталей машин [5]. В то же время влияние этих обработок на износостойкость металлических материалов изучено недостаточно. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по влиянию механической упрочняющей обработки (наклепа) и высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) на абразивную износостойкость двух сталей – 110Г13Л (стали Гадфильда), как наиболее часто применяемого материала для изготовления зубьев ковшей экскаваторов, и 35ХГСА – материала корпусов поворотных резцов проходческих комбайнов.

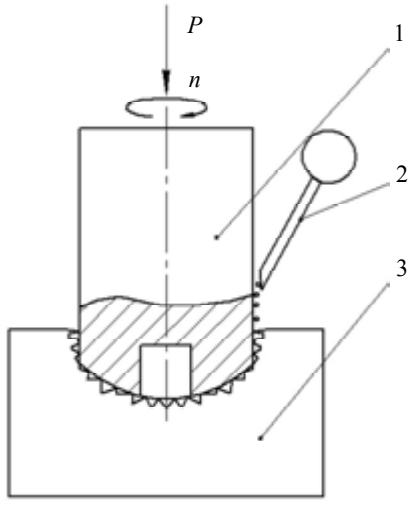


Рис.1. Схема испытаний на абразивный износ
1 – вращающийся образец (n = 685 об/мин);
2 – устройство подачи охлаждающей жидкости;
3 – пластина из абразивного материала

Эксперименты по изучению влияния наклепа проводились на цилиндрических образцах (D = 8 мм) стали 110Г13Л с глухим отверстием (d = 4 мм) по методике, описанной в [3]. Образцы перед испытанием подвергали обычной [2] для стали 110Г13Л термической обработке (закалке с 1100 °С в воде), в результате чего они получали исходную твердость ~170 HV. Для предотвращения разогрева и возможного изменения в структуре стали в процессе испытаний зону контакта образца с абразивом непрерывно смачивали водой (рис.1).

При постоянной статической нагрузке (500 Н) образцы изнашивали при экспозициях t от 10 до 90 с по трем породам. В двух породах – гранит и габбро твердость ~1250 HV выше, чем стали Гадфильда,

* Работа выполнена при участии канд. техн. наук В.С.Бочкова.

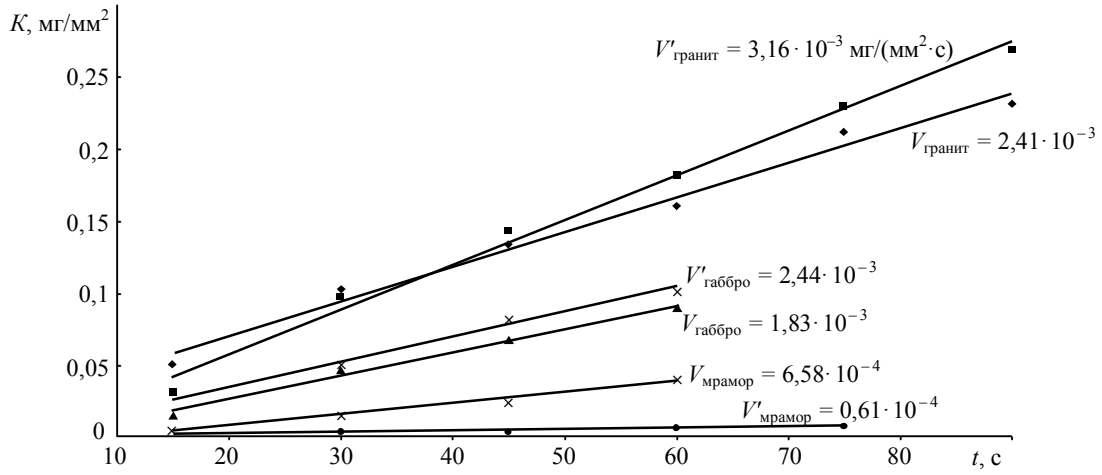


Рис.2. Изменение относительной потери массы исходных (кривые *V*) и наклепанных (кривые *V*′) образцов из стали Гадфильда при абразивном изнашивании по различным породам

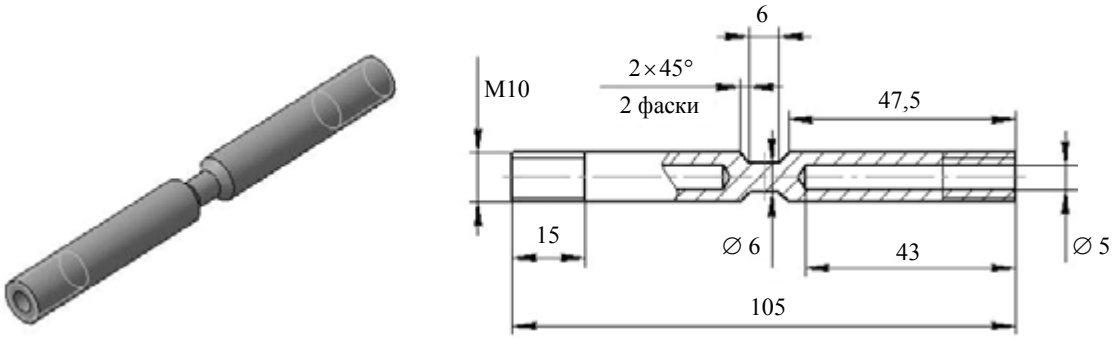


Рис.3. Исходный образец для термомеханической обработки

мрамор по этому показателю уступал (110 HV). По результатам замера массы образца до и после воздействия среды определяли потерю массы металла Δm, которую относили к площади контакта образца с абразивом ($S \sim 50$ мм^2).

Полученные экспериментальные точки зависимости $\Delta m/S = f(t)$ экстраполировали прямой линией, тангенс угла наклона которой принимали за скорость износа *V*. Установленные значения *V* сопоставляли с величинами скорости *V*′, полученными в сравнительных экспериментах на аналогичных наклепанных образцах. Для этого перед каждым испытанием по изнашиваемой поверхности образца наносили удар одинаковой интенсивности металлическим ударником, в результате чего твердость стали в поверхностном слое повышалась до 220 HV. Результаты сравнительных испытаний иллюстрирует график (рис.2).

Как можно заключить из вида графика, сопутствующее ударное воздействие (наклеп) влияет на износостойкость стали Гадфильда по-разному в зависимости от твердости абразивной среды: если в случае пород (гранит, габбро), превышающих по твердости эту сталь в наклепанном состоянии, влияние практически незаметно ($V' \approx V$), то в случае более мягкой породы (мрамор) весьма существенно и уменьшает скорость изнашивания примерно в 10 раз.

Эксперименты по изучению влияния ВТМО на износостойкость проводили на образцах (рис.3) с диаметром рабочей (утонченной) части *d* из стали 30ХГСА, обладающей после типовой термической обработки резцов [4] (изотермическая закалка с 950 °С и низкий отпуск при 230 °С) недостаточной стойкостью к абразивному воздействию горных пород [8].

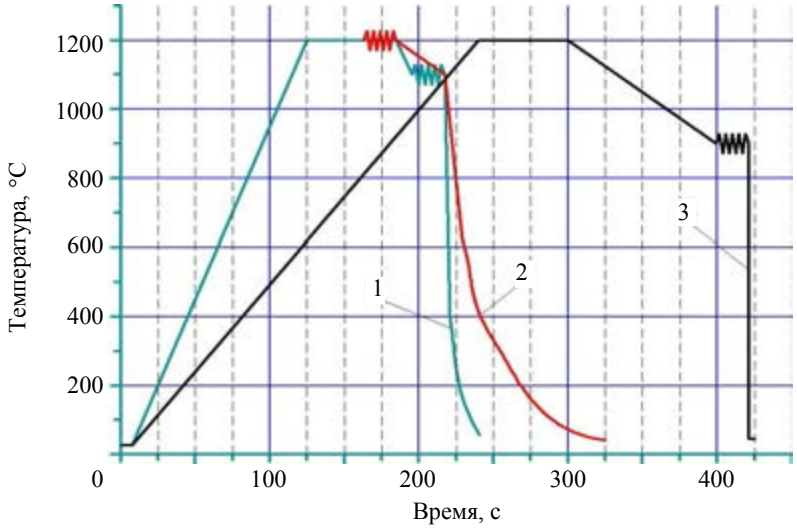


Рис.4. Термограммы термомеханической обработки образцов

Рабочую часть образцов подвергали высокотемпературной циклической деформации сжатием-растяжением [1, 11] с достижением металлом суммарной истинной деформации $\sum \varepsilon_{ист} = 1{,}5$, значение которой для каждого цикла $\varepsilon_{ист} = 2\ln\left(\frac{d_0}{d_0 + \Delta d}\right)$ устанавливали по изменению величины d. ВТМО проводили по трем режимам:

• нагрев рабочей части образца до $T = 1200$ °С со скоростью 9,5 °С/с, выдержка 60 с, охлаждение до 1100 °С со скоростью 10 °С/с, деформация, охлаждение водой со скоростью 90 °С/с (кривая 1 на рис.4);

• нагрев до $T = 1200$ °С со скоростью 9,5 °С/с, выдержка 40 с, деформация, охлаждение до 1100 °С со скоростью 2 °С/с, охлаждение водой со скоростью 18 °С/с (кривая 2 на рис.4);

• нагрев до $T = 1200$ °С со скоростью 5 °С/с, выдержка 60 с, охлаждение до 900 °С со скоростью 3 °С/с, деформация, охлаждение водой со скоростью 180 °С/с (кривая 3 на рис.4).

Затем образцы подвергали низкому отпуску при 230 °С и разрезали поперек по центру их рабочей части с замером твердости HV торцевой поверхности (универсальный твердомер Zwick/RoellZHU).

Ниже представлены результаты замера твердости материала рабочей части образцов после типовой термической обработки (ТТО) и ВТМО, проведенной в различных режимах:

Обработка образцов	Твердость HV, МПа
ТТО	4340
ВТМО, режим 1	4900
ВТМО, режим 2	4560
ВТМО, режим 3	5330

Как видно из полученных результатов, термомеханическая обработка, проведенная в трех режимах, приводит к увеличению твердости материала по сравнению с типовой термической обработкой, используемой при изготовлении корпуса резцов на заводах-изготовителях. Причем максимальное увеличение твердости (на 23 %) наблюдается в случае ВТМО, режим 3.

В следующем цикле испытаний рабочую часть половинок образцов подвергали испытаниям на абразивное изнашивание по методике [3]. Для получения сравнительных данных таким же испытаниям подвергали образцы из стали 35ХГСА аналогичной формы, вырезанные

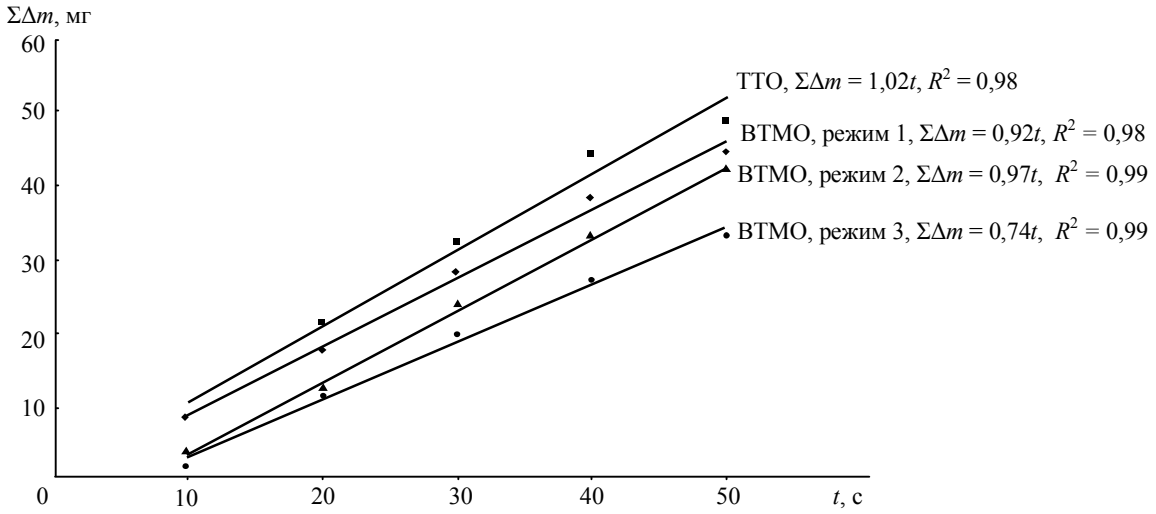


Рис.5. Зависимость потери массы образцов от времени для процесса абразивного изнашивания материала корпуса резца после ТТО и ВТМО по различным режимам

из головной части корпуса резца РШ32 после типовой термической обработки. В качестве абразивной породы использовали песчаник ($\sigma_{сж}$ = 110 МПа, абразивность a = 21 мг) как материал попутной породы, наиболее часто встречающийся при работе проходческих угольных комбайнов.

Результаты испытаний на абразивное изнашивание иллюстрирует рис.5.

Видно (рис.5), что временные зависимости, соответствующие установившейся стадии процесса изнашивания, для всех образцов с достаточной степенью достоверности аппроксимируются прямыми вида $\Sigma\Delta m = Kt$ с коэффициентами пропорциональности K (скоростями изнашивания), отличающимися для каждого вида обработки образцов. Для всех образцов, подвергнутых ВТМО, скорость изнашивания (K = 0,92; 0,97; 0,74) меньше, чем для образцов, подвергнутых ТТО (K = 1,02). При этом наибольший эффект достигается при ВТМО корпуса резца в режиме 3 – износостойкость стали повышается на 38 %.

Полученный положительный эффект может быть объяснен измельчением зерна аустенита и соответствующим уменьшением размеров кристаллов мартенсита в результате высокотемпературной термомеханической обработки образцов. Такое объяснение находится в соответствии с результатами металлографического анализа микроструктуры стали (рис.6): при наибольшей величине игл мартенсита ~20 мкм для образца после ТТО (9-й балл по ГОСТ 8233-56) их величина уменьшается до 4 мкм после ВТМО стали, режим 3 (3-й балл).

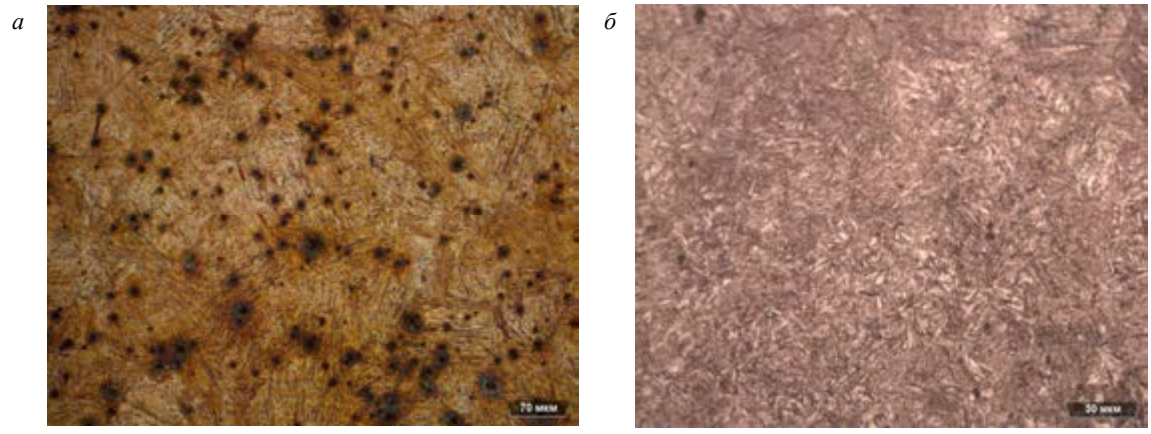


Рис.6. Микроструктура стали 35ХГСА после закалки, х100 (*а*) и ВТМО, режим 3, х500 (*б*)

На основании полученных результатов и с учетом выводов [9], можно сделать следующее заключение о целесообразности применения того или другого метода упрочняющей обработки для повышения износостойкости материалов горного оборудования.

В случае абразивного воздействия сравнительно мягкой породы с твердостью $H_п$, меньшей или незначительно превышающей твердость $H_с$ использованной в оборудовании стали в наклепанном состоянии ($H_п / H_с \leq 1{,}3$ [9]), упрочняющую механическую обработку изнашиваемых деталей целесообразно использовать, например, при работе зубьев из стали Гадфильда ковшей экскаваторов по известняку (HV = 1350-1800 МПа). При вдавливании в деталь зерна такой породы не способны подвергнуть его металл пластической деформации, но оказывая многократную упругую деформацию, приводят к усталостному разрушению поверхностного слоя детали. В результате износ носит не абразивный, а усталостный характер, и наклеп, как показывают представленные выше результаты экспериментов (кривые V' и V на рис.2 для мрамора), является эффективным способом повышения износостойкости изнашиваемых деталей.

При работе по твердым породам ($H_п / H_с > 1{,}3$), когда зерна оказывают режущее действие на металл, операцию механического упрочнения деталей проводить нецелесообразно (кривые V' и V на рис.2 для гранита и габбро). Как показано в [6, 9], при микрорезании металла твердыми абразивными частицами материал дна и наплывов борозд подвергается наклепу с интенсивностью, превышающей уровень, который может быть достигнут при любом пластическом деформировании образца. Поэтому предварительный наклеп деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания по твердой породе, не может способствовать повышению износостойкости их материала. Такой вывод подтверждается результатами и других эрозионных испытаний [7, 10].

Проведение термомеханической обработки следует считать целесообразным для повышения износостойкости деталей независимо от твердости контактирующей с ними породы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние больших деформаций в горячем состоянии на структуру и свойства низкоуглеродистой стали / Н.Г.Колбасников, О.Г.Зотов, В.В.Дураничев и др. // Металлообработка. 2009. № 4 (52). С.25-31.

2. *Давыдов Н.Г.* Высокомарганцевая сталь. М.: Металлургия, 1979. 176 с.

3. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / В.И.Болобов, А.П.Баталов, В.С.Бочков, С.А.Чупин // Записки Горного института. 2014. Т.209. С.17-22.

4. *Крапивин М.Г.* Горные инструменты / М.Г.Крапивин, И.Я.Раков, Н.И.Сысоев. М.: Недра, 1990. 256 с.

5. *Лахтин Ю.М.* Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1976. 407 с.

6. *Львов П.Н.* Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. М.: Машгиз, 1962. 89 с.

7. О целесообразности изготовления зубьев ковшей экскаваторов из стали 110Г13Л / В.И.Болобов, В.С.Бочков, Ю.В.Лыков, А.П.Баталов; Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Труды 10-й Международной научно-практической конференции; Воркутинский горный институт – филиал Национального минерально-сырьевого университета «Горный». Воркута, 2012. С.319-322.

8. Причина быстрого износа тангенциальных резцов / В.И.Болобов, В.С.Бочков, В.В.Бобров, М.П.Талеров // Записки Горного института. 2012. Т.195. С.238-240.

9. *Хрущов М.М.* Закономерности абразивного изнашивания / Износостойкость. М.: Наука, 1975. С.5-28.

10. *Хрущов М.М.* Исследования изнашивания металлов / М.М.Хрущов, М.А.Бабичев. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 352 с.

11. Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing / A.A.Naumov, Y.A.Bezobrazov, N.G.Kolbasnikov, E.V.Chernikov // Materials Science Forum. 2013. Vol.762. P.62-69.

REFERENCES

1. *Kolbasnikov N.G.*, *Zotov O.G.*, *Duranichev V.V.* a*nd al.* Vliyanie bol'shikh deformatsii v goryachem sostoyanii na strukturu i svoistva nizkouglerodistoi stali (*Influence of large deformation in the hot condition on the structure and properties of low-carbon steel*). St Petersburg. Metalloobrabotka.. 2009. N 4 (52), p.25-31.

2. *Davydov N.G.* Vysokomargantsevaya stal' (*Manganese steels*). Moscow: Metallurgiya, 1979, p.176.
3. *Bolobov V.I.*, *Batalov A.P.*, *Bochkov V.S.*, *S.A.Chupin*. Iznosostoikost′ stali 110G13L v razlichnykh abrazivnykh sredakh (*About wear resistance of steel 110G13L in a variety of abrasive media*). Zapiski Gornogo instituta. Vol.209, 2014, p.17-22.
4. *Krapivin M.G.*, *Rakov I.Ja.*, *Sysoev N.I.* Gornye instrumenty (*Mining tools*). Moscow: Nedra, 1990.
5. *Lahtin Y.M.* Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov (*Metallurgy and heat treatment of metals*). Moscow: Metallurgiya, 1976, p.407.
6. *L'vov P.N.* Iznosostoikost' detalei stroitel'nykh i dorozhnykh mashin (*Wear resistance of parts of building and road machines*). Moscow: Mashgiz, 1962, p.89.
7. *Bolobov V.I.*, *Bochkov V.S.*, *Lykov Ju.V.*, *Batalov A.P.* O tselesoobraznosti izgotovleniya zub'ev kovshei ekskavatorov iz stali 110G13L (*On the feasibility of production of excavator bucket teeth made of steel 110G13L*). Osvoenie mineral'nykh resursov Severa: problemy i resheniya: Trudy 10-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; Vorkutinskii gornyi institut – filial Natsional'nogo mineral'no-syr'evogo universiteta «Gornyi». Vorkuta, 2012, p.319-322.
8. *Bolobov V.I.*, *Bochkov V.S.*, *Bobrov V.V.*, *Talerov M.P.* Prichina bystrogo iznosa tangentsial'nykh reztsov (*The cause of rapid wear of tangential cutters*). Zapiski Gornogo instituta. Vol.195. 2012, p.238-240
9. *Khrushhov M.M.* Zakonomernosti abrazivnogo iznashivaniya (*The regularities of abrasive wear*). Iznosostojkost'. Moscow: Nauka, 1975, p.5-28.
10. *Khrushchov M.M.*, *Babichev M.A.* Issledovaniya iznashivaniya metallov (*Researches of wear metals*). Moscow. Izd-vo AN SSSR, 1960, p.352.
11. *Naumov A.A.*, *Bezobrazov Y.A.*, *Kolbasnikov N.G.*, *Chernikov E.V.* Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing. Materials Science Forum. 2013. Vol.762, p.62-69.

INFLUENCE OF THE TYPE OF HARDENING TREATMENT ON WEAR-RESISTANT MATERIALS OF MINING EQUIPMENT

V.I.BOLOBOV, *Dr. of Engineering Sciences*, *Professor*, *Boloboff@mail.ru*
S.A.CHUPIN, *Assistant Lecturer*, *Staseg-88@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*

For example, steel 110G13L as the material of teeth of excavator buckets, shows that the work hardening (hardening) is an effective means to increase (up to 10 times) the wear resistance of components in contact with abrasive media, such as marble, yielding the steel in a state of hardening of hardness. In the case of wear on the rocks (granite, gabbro) with a hardness greater than the hardness of steel, the effect of hardening has almost no effect. It was found that high-temperature thermomechanical treatment of steel 35HGSA as the material of holders of rotary cutters (strain at 900 °C, water quenching, tempering at 230 °C) leads to a substantial increase of its hardness (23 %) and durability (38 %) compared to typical heat treatment used in the manufacture of cutting tools at the factory.

***Key words*:** materials of the working tool, hardening, thermomechanical treatment, rocks, the rate of wear.