

**Андрущенко М.И.,  
Куликовский Р.А.,  
Холод А.В.,  
Осипов М.Ю.**

Запорожский национальный технический университет,  
г. Запорожье, Украина  
E-mail: [mosipov61@ukr.net](mailto:mosipov61@ukr.net)

**УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫМ  
СОСТОЯНИЕМ И СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬЮ  
АБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ  
НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

УДК 621.791.927.5:669.15

Исследовалась возможность реализации потенциала наиболее износостойких модельных сталей системы Fe-C-Cr с большим количеством высокоуглеродистого метастабильного аустенита при упрочнении и восстановлении наплавкой штампов пресс-форм для прессования огнеупорных и строительных изделий. Установлена необходимая скорость охлаждения наплавленного металла типа 150X3, и предложен способ обеспечения оптимальной структуры при наплавке штампов.

**Ключевые слова:** структура, абразивное изнашивание, наплавка, скорость охлаждения, термический цикл, метастабильный аустенит.

#### **Введение, постановка задачи**

Известно, что одним из эффективных путей повышения износостойкости деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, является использование сталей с большим количеством остаточного метастабильного аустенита [1 - 3]. Вместе с тем в результате исследования сталей системы Fe-C-Cr было установлено [4], что обеспечение в структуре большого количества остаточного аустенита путем повышения содержания углерода многократно эффективнее, чем за счет содержания хрома. Так, износостойкость сталей этой системы легирования в бескарбидном состоянии, содержащих до 90 % аустенита, при высоком содержании углерода (1,5 - 1,7 %) и незначительном количестве хрома (3,0 - 3,5 %) в 5 раз выше, чем сталей с большим количеством хрома (до 19 %) и при относительно низком содержании углерода. Поэтому в дальнейшем предполагалось использовать высокоуглеродистые составы в качестве наплавленного металла, в частности, при упрочнении и восстановлении штампов пресс-форм для прессования огнеупорных и строительных изделий.

Однако исследования, проведенные в работе [4], были выполнены в лабораторных условиях на модельных сплавах, закаленных в масле при сравнительно высоких скоростях охлаждения  $\nu_{650 \dots 550} \approx 150^\circ \text{C/s}$  [5]. В тоже время, для неуправляемого термического цикла наплавки, характерны пониженные скорости охлаждения, чем при закалке в масле, что может являться дополнительным фактором влияния на структурное состояние и износостойкость материалов. В связи с этим, целью работы являлась проверка полученных результатов в производственных условиях и поиск путей реализации потенциала наиболее износостойких модельных сплавов при упрочнении и восстановлении штампов пресс-форм.

#### **Материалы и методика исследований**

Наплавку штампов осуществляли штучными покрытыми электродами. Содержание углерода в наплавленном металле увеличивалось от 0,5 до 1,6 %, а хрома – соответственно уменьшалось от 19 до 0,1 % пропорционально влиянию этих элементов на температуру начала мартенситного превращения.

Наплавка штампов производилась без предварительного подогрева по всему периметру рабочей кромки. Испытания проводили до допустимого износа кромок. Износостойкость оценивали по количеству выпущенной продукции за время работы штампов.

Необходимо отметить, что испытания в рамках действующего производства достаточно трудоемки и связаны с организационными сложностями. При этом разброс результатов выше, чем при испытаниях на лабораторной установке. Несложные расчеты по известной методике [6, 7] показали, что для достижения достоверности данных на таком же уровне, как и при испытаниях в лабораторных условиях (надежность 0,9, при погрешности не более 5 %), потребовалось бы в 3 раза больше экспериментов на натуральных деталях, что практически было невозможно. Поэтому полученные на этом этапе работы результаты рассматривались в основном на качественном уровне, как данные, позволяющие выявить основные тенденции изменения износостойкости наплавленного металла в зависимости от дополнительных условий, влияющих на формирование его структуры и оценить возможность реализации потенциала сплавов с высокой способностью к упрочнению при восстановлении натуральных деталей.

### Результаты исследований и их обсуждение

Обобщенные результаты производственных исследований в сопоставлении с данными об износостойкости модельных сплавов схематически представлены на рис. 1. В начале исследуемого диапазона соотношений углерода и хрома, с повышением содержания углерода и уменьшением количества хрома в наплавленном металле, износостойкость кромок штампов, как и опытных модельных сплавов испытанных в лабораторных условиях, возрастает практически в одинаковой мере. Однако в дальнейшем интенсивность роста износостойкости наплавленного металла с повышением содержания углерода снижается. Достигнув максимума сопротивляемости изнашиванию существенно ниже уровня ожидаемого на основании результатов лабораторных испытаний модельных закаленных сплавов, износостойкость наплавленных штампов уменьшается.

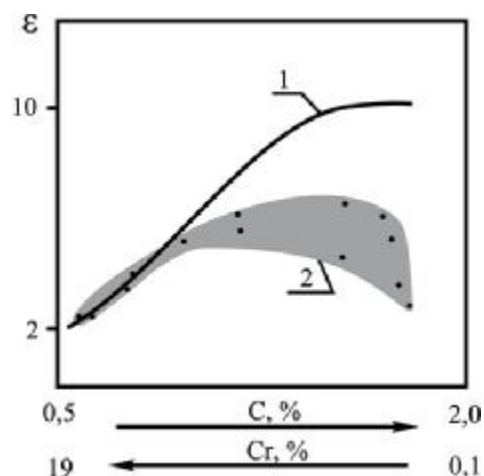


Рис. 1 – Схема изменения степени упрочнения и износостойкости опытных сплавов системы Fe-C-Cr в зависимости от способа охлаждения:  
 1 – относительная износостойкость модельных сплавов, закаленных в масле;  
 2 – относительная износостойкость наплавленного металла (охлаждение на воздухе)

Таким образом, потенциал износостойкости высокоуглеродистых, незначительно легированных хромом сталей, реализуется далеко не в полной мере, если структура наплавленного металла была сформирована в условиях нерегулируемого термического цикла.

Металлографические исследования высокоуглеродистого, незначительно легированного наплавленного металла показали, что его структура на различных участках наплавленной кромки (по периметру штампа) не одинакова. На участке валика, сформированного в начале процесса восстановления штампа, структурное состояние металла ближе к структуре закаленных модельных сплавов. Однако на последующих участках валика, в структуре преобладает мартенситная составляющая, включающая существенное количество карбидов цементитного типа. В некоторых случаях (особенно на штампах малой массы) на замыкающих периметр участках валика, сформированных при завершении наплавки, образуются промежуточные структуры.

Таким образом, причиной несоответствия результатов лабораторных и производственных испытаний модельных закаленных в масле и наплавленных опытных сплавов могут являться существенные различия структурных состояний.

Количественная оценка сопротивляемости изнашиванию металла в зависимости от структуры непосредственно на натуральных деталях практически невозможна в связи с тем, что этот набор структур из-за различия в скоростях охлаждения в начальной и последующей частях наплавленного валика образуется на одной и той же детали. Для количественной оценки износостойкости наплавленного металла в зависимости от структуры в лабораторных условиях необходимо или моделировать "фрагменты" термического цикла наплавки при термообработке опытных образцов, либо создать образцы с таким же набором структур в наплавленном металле путем изменения режимов их термической обработки. Сравнительная оценка этих способов исследования показала, что более предпочтительным по трудоемкости является второй вариант. Поэтому в дальнейшем набор структур, которые могут быть сформированы в наплавленном слое, создавали путем термической обработки высокоуглеродистых сплавов.

Изучали два способа предупреждения распада аустенита в наплавленном металле:

1) увеличение скорости охлаждения наплавленного металла до значения не ниже критической путем принудительного отвода тепла от наплавляемой детали (валика);

2) повышение устойчивости аустенита к перлитным и промежуточным превращениям в процессе охлаждения, за счет дополнительного легирования.

Определение критической скорости охлаждения  $v_k$ , позволяющей избежать выделения карбидов из аустенита, производили по формуле (1) [8] в соответствии со схемой (рис. 2) по данным известных диаграмм [9]:

$$v_k = \frac{A_1 - t_M}{1,5\tau_M}, \quad (1)$$

где  $A_1$  – температура критической точки, °С;

$t_M$  – температура минимальной устойчивости аустенита, °С;

$\tau_M$  – время минимальной устойчивости аустенита, с.

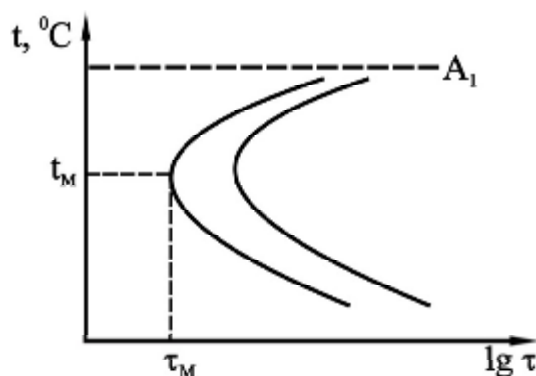


Рис. 2 – Схема определения параметров на диаграмме изотермического распада аустенита для вычисления критической скорости охлаждения [10]

Критическая расчетная скорость охлаждения для сплава 150X3, обеспечивающая после закалки на аустенит наибольший уровень износостойкости, составляет  $\approx 11^\circ \text{C}/\text{с}$ .

Оценка известных способов ускорения отвода теплоты (неполное окунание детали в охлаждающую жидкость, обдув сжатым воздухом, применение эндотермических флюсов и др.) с точки зрения их технологичности и эффективности показала, что применительно к штампам пресс-форм наиболее приемлемым является использование медных водоохлаждаемых формирователей.

Для проведения опытных работ изготовлен водоохлаждаемый формирователь (рис. 3) представляющий собой сборную конструкцию, состоящую из медного кристаллизатора и стального основания с полостью для циркуляции охлаждающей жидкости.

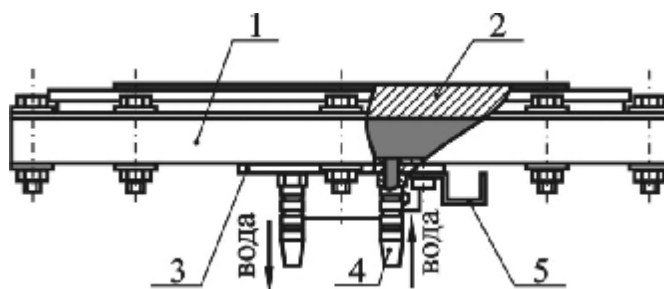


Рис. 3 – Схема водоохлаждаемого формирователя:  
1 – корпус; 2 – медный кристаллизатор;  
3 – фланец; 4 – штуцер; 5 – фиксатор

Наплавка проводилась электродами  $\varnothing 4 \text{ мм}$  на следующих режимах: сварочный ток – 150 ... 160 А, напряжение – 28 ... 30 В, скорость наплавки – 7 ... 10 м/ч. Толщина наплаваемых штампов составляла 8 ... 22 мм.

Оценку скорости охлаждения наплавленного металла, как в условиях естественного охлаждения, так и принудительного, осуществляли с помощью терморпары по схеме аналогичной предложенной в ра-

боте [11] (рис. 4). Термопара "вмораживалась" в хвостовую часть сварочной ванны на глубину 2...2,5 мм от поверхности.

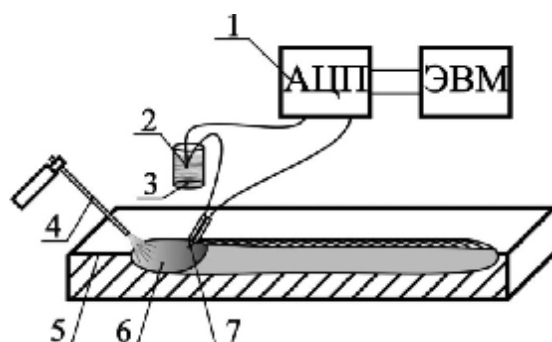


Рис. 4 – Схема определения скорости охлаждения наплавленного металла  
1 – аналогово-цифровой преобразователь; 2 – холодный спай;  
3 – колба со льдом; 4 – электрод; 5 – наплавляемая кромка образца;  
6 – сварочная ванна; 7 – горячий спай

Изучение термического цикла при наплавке штампов минимальных толщин без принудительного охлаждения показало, что наплавленный металл в начале валика остывает с достаточно высокой скоростью  $38^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (рис. 5), что гарантированно обеспечивает формирование бескарбидной аустенитной структуры при наплавке сплавом типа 150X3.

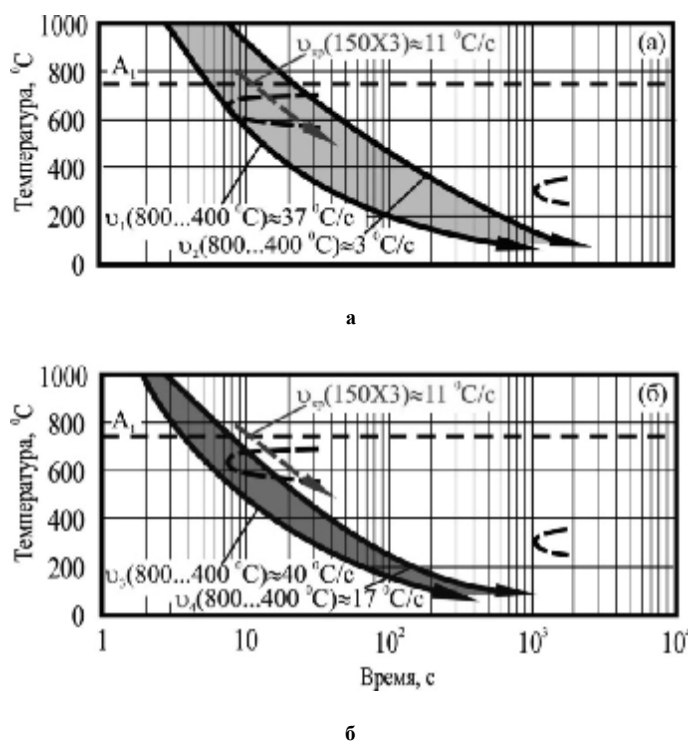


Рис. 5 – Изменение скоростей охлаждения наплавленного металла 150X3 в зависимости от способа теплоотвода в процессе наплавки:  
а – на воздухе ( $u_1 \dots u_2$ );  
б – с применением водоохлаждаемого формирователя ( $u_3 \dots u_4$ )

Однако, по мере продолжения наплавки по периметру детали в условиях ограниченного теплоотвода, скорость охлаждения уменьшалась (особенно на штампах малых толщин) до  $3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Естественно, это приводило к выпадению карбидов цементитного типа, снижению содержанию углерода в аустените, повышению температуры начала мартенситного превращения. В результате, в этой части наплавленного валика, вместо необходимой преимущественно аустенитной бескарбидной структуры с повышенной способностью к упрочнению и износостойкостью, формировались мартенсито-карбидные или промежуточные структуры (рис. 6).

Исследования термического цикла наплавки валика с применением водоохлаждаемого формирователя показали, что диапазон скоростей охлаждения металла наплавленных участков, сформированных в начале процесса и на завершающем этапе наплавки детали по периметру, отличаются незначительно - в 2 ... 2,5 раза против 10 ... 15 раз при наплавке без принудительного теплоотвода. Но главное преимущество в данном случае - наименьшая скорость охлаждения превышает критическое значение для низколегированной высокоуглеродистой стали 150X3, это гарантирует формирование однородной необходимой структуры на всем протяжении наплавленной кромки детали.

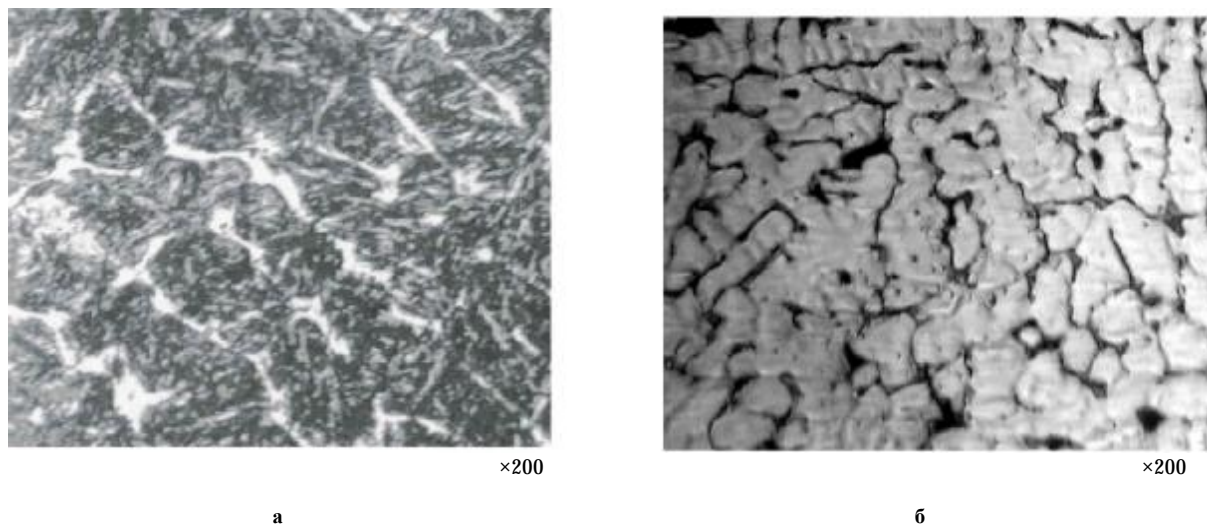


Рис. 6 – Структура наплавленного металла 150X3 в зависимости от способа теплоотвода в процессе наплавки:  
а – на воздухе ( $u_{охл.} \gg 3^\circ \text{C/s}$ );  
б – с применением водоохлаждаемого формирователя ( $u_{охл.} \gg 17^\circ \text{C/s}$ )

Испытания металла данного состава наплавленного с принудительным охлаждением показали, что его износостойкость практически соответствует уровню сопротивляемости изнашиванию, достигаемому на закаленных модельных сплавах (рис. 7).

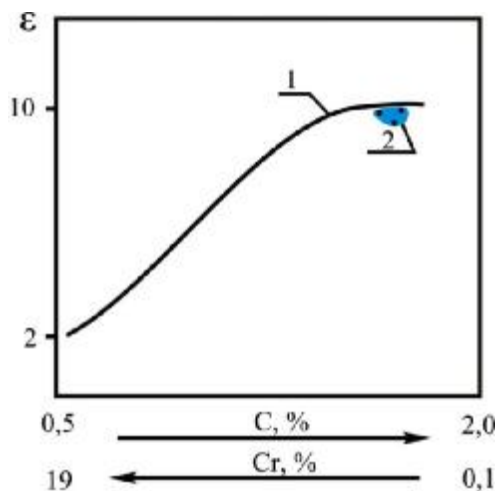


Рис. 7 – Схема изменения износостойкости опытных сплавов системы Fe-C-Cr в зависимости от способа охлаждения  
1 – относительная износостойкость модельных сплавов закаленных в масле;  
2 – относительная износостойкость металла наплавленного с использованием медного водоохлаждаемого формирователя

Таким образом, применение принудительного охлаждения при наплавке штампов позволяет реализовать потенциал по способности к упрочнению и износостойкости высокоуглеродистых низколегированных хромом сталей в наплавленном состоянии.

---

## Выводы

Потенциал износостойкости сталей с большим количеством высокоуглеродистого метастабильного аустенита незначительно легированных хромом, реализуется далеко не в полной мере в наплавленном состоянии, если структура наплавленного металла сформирована в условиях нерегулируемого термического цикла наплавки. Причина этого – выпадение карбидов цементитного типа из-за недостаточной скорости охлаждения, уменьшения содержания углерода в твердом растворе и количества остаточного аустенита.

Исключение распада аустенита при охлаждении наплавленного металла и формирование необходимой, преимущественно аустенитной бескарбидной структуры при наплавке высокоуглеродистыми низкохромистыми сплавами, возможно путем принудительного отвода теплоты.

Критическая скорость охлаждения металла для наплавки штампов пресс-форм должна быть не менее  $11^{\circ} \text{C/s}$ .

## Литература

1. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин. / Под. ред. В.С. Попова. – Запорожье.: Изд-во ОАО "Мотор Сич", 2000. – 394 с.
2. Филиппов М.А. Стали с метастабильным аустенитом / М.А. Филиппов, В.С. Литвинов, Ю.Р. Немировский – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
3. Чейлях А.П. Возможности создания метастабильных состояний аустенита в сплавах на основе железа / А.П. Чейлях // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2002. - №2. – С. 31-34.
4. Андрущенко М.И. Влияние углерода и хрома на способность к упрочнению и износостойкость бескарбидных сталей в условиях абразивного изнашивания / М.И. Андрущенко, О.Э. Рузов, Р.А. Куликовский, Н.Н. Брыков // Проблеми трибології (Problems of Tribology). - 2003. - №2. - С. 112-116.
5. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы / М.А. Тылкин – М.: Металлургия, 1981. – 648 с.
6. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
7. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник – М.: Наука, 1968. – 288 с.
8. Геллер Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
9. Попов А.А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А.А. Попов, Л.Е. Попова – М.: Металлургия, 1965. – 495 с.
10. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев – М.: Металлургия, 1978. – 645 с.
11. Брыков М.Н. Испытание металлических материалов на абразивное изнашивание при повышенных температурах / М.Н. Брыков // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – №1. – С. 94-97.

Поступила в редакцію 22.08.2014

Andrushchenko M.I., Kulikovskiy R.A., Holod A.V., Osipov M.Y. **Control of the structural condition and abrasive wear resistance of weld metal with the help of processing methods.**

The ability to realize potential of most wear resistant model steels of Fe-C-Cr system rich in metastable high-carbon austenite in the process of hardening and repair by welding of press-tool dies for refractory and building products pressing has been studied. It has been determined that wear resistant potential of steels of the above class is being realized not to the full extent in the deposited condition, if the structure of the deposited metal was formed under conditions of uncontrolled thermal cycle of weld deposit. Wear resistance of 150X3 type metal in the deposited condition is 2 or 3 times lower than after hardening in oil to austenitic structure mainly. The reason is the formation of cementite type carbides through low cooling rate, reduction of carbon content in the solid solution and quantity of retained austenite.

Exclusion of austenite breakdown in the process of weld metal cooling as well as formation of necessary, mainly austenitic, non-carbide structure upon weld deposit with high-carbon low-chrome alloys is possible by means of forced heat elimination. The most efficient way of doing this is the use of water-cooled copper formers. Formers' structure diagram has been offered. The critical cooling rate for 150X3 type weld metal, when necessary structure rich in metastable high-carbon austenite is formed, has been determined. Due to this, wear resistance of the deposited dies increased by a factor of three.

**Key words:** structure, abrasive wear, weld deposit, refrigeration rate, thermal cycle, metastable austenite.

### References

1. Vosstanovlenie i pvyshenie iznosostojkosti i sroka sluzhby detalej mashin. Pod. red. V.S. Popova. Zaporozh'e.: Izd-vo OAO "Motor Sich", 2000. 394 s.
2. Filippov M.A. Stali s metastabil'nym austenitom. M.A. Filippov, V.S. Litvinov, Ju.R. Nemirovskij. M.: Metallurgija, 1988. 256 s.
3. Chejljah A.P. Vozmozhnosti sozdaniya metastabil'nyh sostojanij austenita v splavah na osnove zheleza. Novi materialy i tehnologii v metalurnii ta mashinobuduvanni. 2002. №2. S. 31-34.
4. Andrushhenko M.Ij. Vlijanie ugleroda i hroma na sposobnost' k uprochneniju i iznosostojkost' beskarbidnyh stalej v uslovijah abrazivnogo iznashivaniya. M.I. Andrushhenko, O.Je. Ruzov, R.A. Kulikovskij, N.N. Brykov. Problemy tribologii (Problems of Tribology). 2003. №2. S. 112-116.
5. Tylkin M.A. Spravochnik termista remontnoj sluzhby. M.: Metallurgija, 1981. - 648 s.
6. Solonin I.S. Matematicheskaja statistika v tehnologii mashinostroenija. M.: Mashinostroenie, 1972. 216 s.
7. Pustyl'nik E.I. Statisticheskie metody analiza i obrabotki nabljudenij. M.: Nauka, 1968. - 288 s.
8. Geller Ju.A. Instrumental'nye stali. M.: Metallurgija, 1983. 527 s.
9. Popov A.A. Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereohlazhdennogo austenita. A.A. Popov, L.E. Popova. M.: Metallurgija, 1965. 495 s.
10. Guljaev A.P. Metallovedenie. M.: Metallurgija, 1978. - 645 s.
11. Brykov M.N. Ispytanie metallcicheskih materialov na abrazivnoe iznashivanie pri povyshennyh temperaturah. Novi materialy i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. 2004. №1. S. 94-97.