

## ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ

Штамповочные работы занимают одно из ведущих мест в производственном процессе изготовления летательного аппарата. В основной своей массе элементы каркаса планера самолёта и вертолёта, обшивки, шпангоуты и стрингеры изготавливают в цехах штамповочного производства.

При серийном производстве тяжелого самолёта применяется более 10 тысяч вытяжных, гибочных, формовочных и разделительных штампов, десятки тысяч шаблонов, сотни пуансонов, несколько тысяч формблоков, а также другой оснастки для формообразования и контроля деталей. В связи с этим актуальна проблема прочности и износостойкости рабочих поверхностей деталей штампов.

Условия трения и износа режущих элементов штампов весьма специфичны и имеют свои особенности в сравнении с общим случаем трения деталей машин. Они зависят от внешней нагрузки, физико-механических свойств рабочих частей (пуансонов и матриц) и изнашивающей способности штампуемого материала. Рабочие элементы штампов обычно изготавливаются из инструментальных сталей (У8, У10, ХВГ, Х12, Х12М, Х12Ф1). Основные недостатки этих сталей – обезуглероживание поверхностного слоя при термической обработке, анизотропия свойств по сечению деталей, повышенная чувствительность к флокенообразованию, склонность к отпускной хрупкости, сравнительно высокая стоимость

В последние годы в мире появилось большое количество сообщений о повышении эксплуатационных свойств инструментальных сталей после их закалки до температур жидкого азота ( $-196^{\circ}\text{C}$ ).

Считается, что криогенная закалка инструментальных сталей с последующим отпуском увеличивает их износостойкость и прочность за счет трех факторов:

1) Полного превращения остаточного аустенита в мартенсит при охлаждении до сверхнизких температур;

2) Образования однородных мелкодисперсных  $\eta$ -карбидов, возникающих при последующем нагреве стали в результате химического взаимодействия углерода, часть которого при низких температурах образует кластеры с легирующими элементами, присутствующими в инструментальных сталях;

3) Снятия остаточных напряжений, имеющих в любом материале вследствие наличия дефектов кристаллической структуры и дефектов,

возникших при предыдущей термической или механической обработке материала.

В ряде работ утверждается, что процесс превращения остаточного аустенита в мартенсит в среде жидкого азота в большей степени зависит от температуры, чем от длительности охлаждения, и что кратковременное воздействие данной температурой на образец может дать такой же результат, как и выдержка в течение нескольких дней.

Однако исследование, проведенное в [1], показало, что выдержка при  $-190^{\circ}\text{C}$  в течение 24 часов существенно увеличивает износостойкость деталей по сравнению с криогенной обработкой в течение 1, 5, 10 и 16 часов [1].

Кроме того, в работе [2] показано, что применявшаяся кратковременная обработка резцов из быстрорежущей стали в среде жидкого азота «методом термоудара» (10 – 40 мин) увеличивает стойкость резцов в 1,4 раза, но при этом на глубине около 4 мм следов воздействия криогенной обработки (изменения микроструктуры стали) не наблюдается.

По данным компании Integrated Cryogenic Systems Inc., Канада, износостойкость инструментальных сталей, подвергнутых криогенной обработке, может увеличиваться в 2 – 2,5 раза в сравнении с традиционными методами термообработки.

По данным других исследователей, степень увеличения износостойкости может изменяться в пределах от нескольких десятков процентов (для вольфрамовой быстрорежущей стали T1 – 92%), до 5 – 8 раз (для хромистых сталей, предназначенных для штампового инструмента – стали D-2, A-2, Fe-12Cr-MoV-1.4C) [2,4].

Противоречия в заявляемых данных могут быть объяснены эффектом криогенного старения, наблюдающимся на фоне превращения остаточного аустенита

В работе [3] после криогенной обработки при  $-180^{\circ}\text{C}$  наблюдалось выделение мелкозернистых карбидов вместо обычных карбидов и отмечалось увеличение износостойкости и ударной вязкости.

В работе [5] пришли к выводу, что криогенная обработка наиболее эффективна, если применяется при продолжительной выдержке в криогенной среде сразу после обычной закалки. При этом время выдержки в криогенной среде является более важным фактором, чем температура криогенной среды.

В работе [6] установлено наличие высокодисперсных карбидов  $\text{Fe}_2\text{C}$  в инструменте из быстрорежущей стали (HSS), и установлена линейная зависимость между температурой криогенной закалки и скоростями (интенсивностью) изнашивания.

Изучение инструментальной стали M2 (аналог P6M5), подвергнутой криогенной обработке, включающей в себя выдержку в криогенной

среде в течение недели, показало образование кластеров из углерода (графита), появляющихся в результате увеличения плотности карбидов при последующей обработке [7].

Представленный разброс значений в публикуемых результатах показывает, что все еще нет достаточного количества экспериментальных данных, необходимых для оптимизации условий криогенной обработки в производственной практике.

**Целью данной работы** является исследование влияния криогенной обработки на свойства отечественных инструментальных сталей путем проверки различных режимов термообработки, включая этап криогенной закалки применимо к штамповой стали *X12M* (приблизительным аналогом которой является сталь *Fe-12Cr-MoV-1.4C*), которая лучше всего реагирует на криогенную обработку с точки зрения износостойкости.

**Методика эксперимента.** Для проведения экспериментов на штамповой стали *X12M* (номинальное содержание химических элементов С – 1,45%, Cr – 12%, Mo – 0,6%, W – 0,5 ... 0,8%, V – 0,15 ... 0,30%) изготавливались два типа образцов:

Образцы первого типа – диски диаметром 10 мм и толщиной 4 мм твердостью 59-61 HRC для испытаний на изнашивание по типу «штифт – диск»

Образцы второго типа - бруски размером 10×10 мм для испытаний на ударную вязкость KCV.

Для получения статистически обоснованных значений средних величин план эксперимента (рис. 1) включал в себя шесть вариантов термической обработки, в которых испытывали по пять наборов образцов обоих типов.

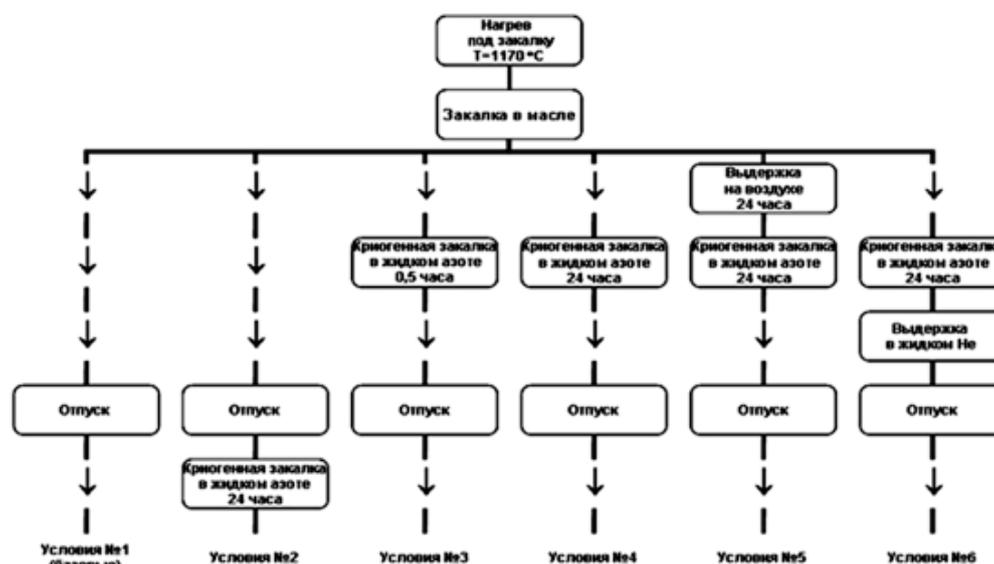


Рисунок 1 – Схемы термообработок штамповой стали *X12M*

Во всех шести случаях перед криогенной обработкой проводилась одинаковая предварительная процедура нагрева под закалку при температуре 1170°C в течение 1 часа и закалка в масле, как показано на рис 1. Кроме того, во всех случаях образцы подвергались низкому отпуску при температуре 250°C в течение 2 часов.

При термической закалке по шестому варианту дополнительно включали этап закалки в жидком гелии при температуре -269°C, когда криогенно охлажденные образцы переносились непосредственно из ванны с жидким азотом в ванну с жидким гелием без промежуточного нагрева.

Эксперимент с жидким гелием вошел в план эксперимента для того, чтобы проверить влияние криогенных температур на структуру стали, которые, как следует из работы [8], способствуют снижению твердости и двойникованию аустенитной фазы при температурах, ниже нормальной точки кипения жидкого азота.

Эффективность показанных на рис. 1 режимов термообработки оценивались двумя методами испытания на износ, измерением микротвердости и поверхностной твердости. Кроме того, для оценки воздействия низких температур проводились испытания на ударную вязкость. Исследование поверхности образцов проводились методом сканирующей электронной микроскопии и исследованием элементного состава карбидов.

Результаты изнашивания первым способом – микроцарапанием образцов алмазной иглой диаметром 20 мкм, после различных схем термообработки на отрезке длиной 4,2 мм при линейно увеличивающейся нагрузке показаны на рис. 2.

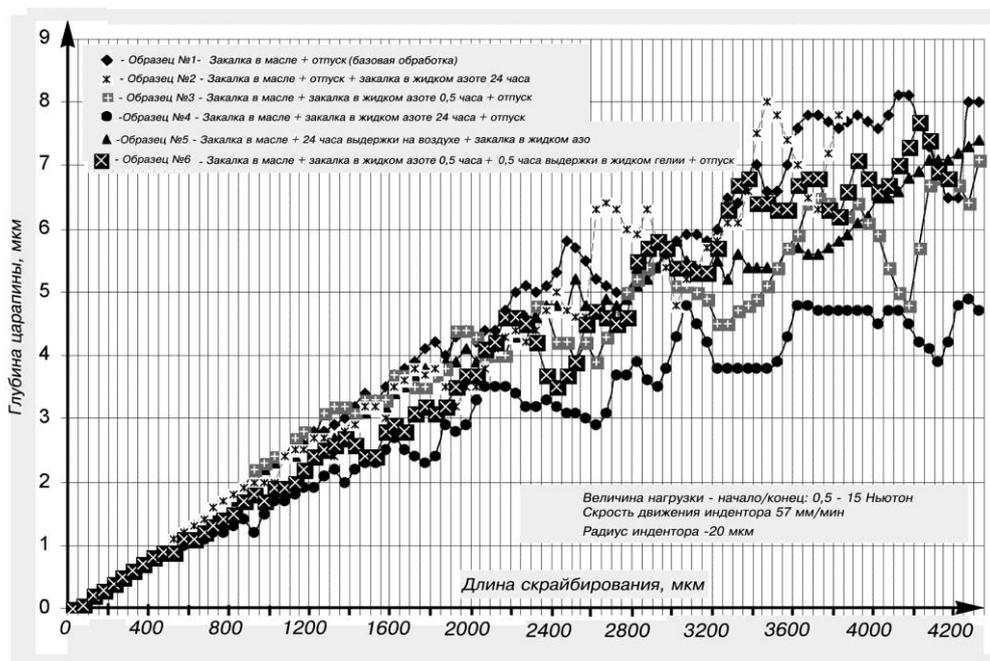


Рисунок 2 - Профили износа при микроцарапании образцов №1 – 6

Суммарная площадь износа для каждого из образцов во время этих испытаний оценивалась как площадь под профилем кривой глубины износа вдоль длины линии царапания.

Неоднородность роста глубины износа (царапания) вдоль длины линии царапания, наблюдающаяся на профилях износа, объясняется скоплением карбидов в материале основы.

Профиль износа образца, обработанного в условиях № 1 (условия, принятые за основу – стандартная термообработка стали X12M), является самым глубоким из всей серии обработанных на разных режимах образцов. В то же время профиль износа образца № 4 (выдержанного в течение 24 часов в ванне жидкого азота после закалки в масле с последующим отпуском) наиболее мелкий и скачкообразный, указывающий на наличие большого количества в нем износостойких карбидов.

В качестве второго метода испытания на износ использовался метод изнашивания по схеме "штифт–диск", в котором неподвижный шарик из стали У8 твердостью 60 HRC используется в качестве штифта, а вращающиеся диски имеют твердость приблизительно такую же, как и шарик (рис. 3).

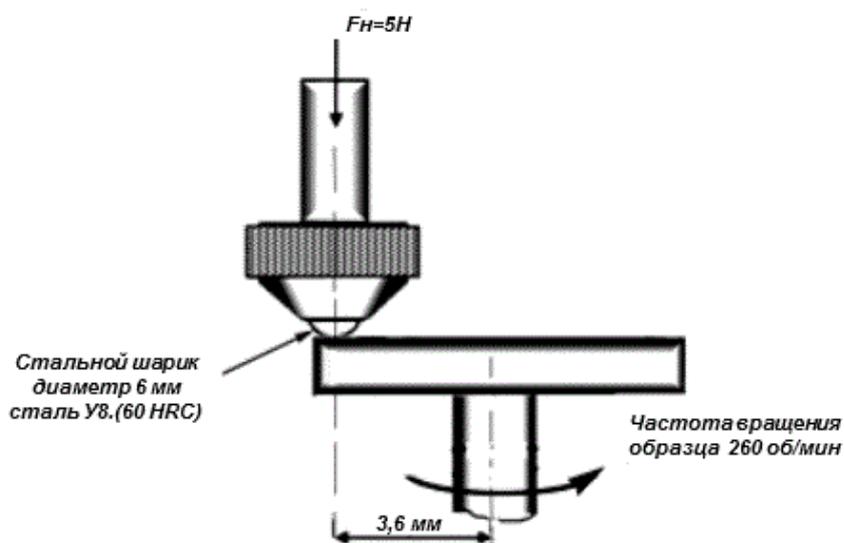


Рисунок 3 - Схема испытаний на износ по схеме "штифт–диск".

Показателем изнашивания при испытаниях на износ по схеме «штифт–диск» являлась величина диаметра «лыски износа» на поверхности шарика, выступающей в роли индикатора интенсивности изнашивания пары трения.

Во время проведения этих испытаний максимально изнашивались образцы, термообработанные в условиях № 1, о чем свидетельствуют наибольшая по размерам поверхность изношенного материала шарика (рис.4, б) и след износа на поверхности диска (рис. 4, г).

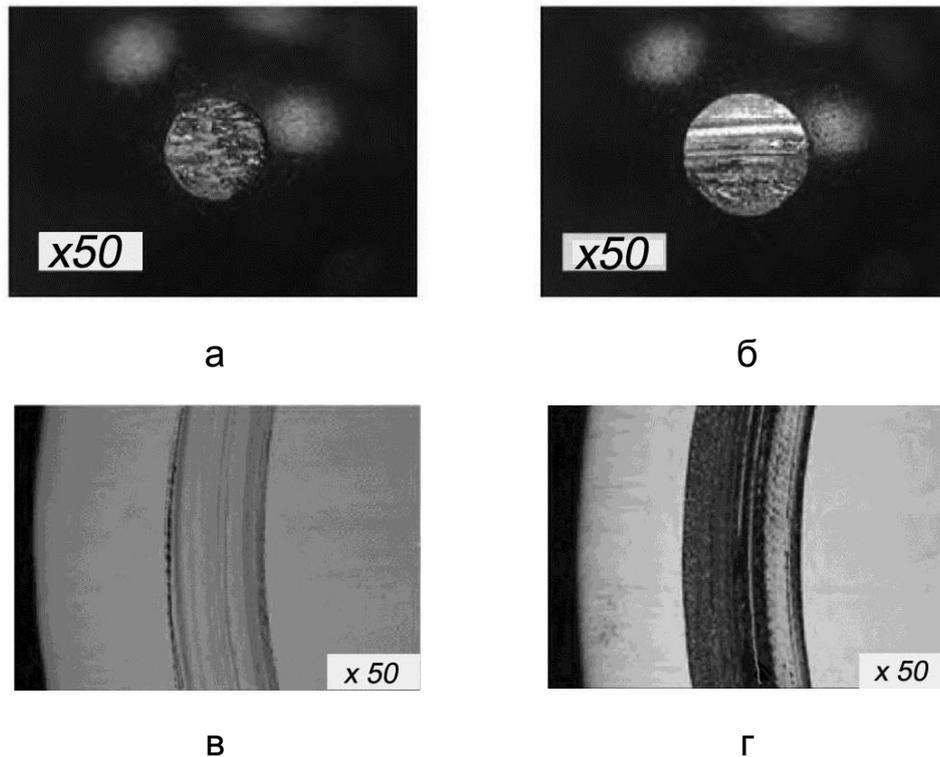


Рисунок 4 - Износ шарика из стали У8 (а,б) и диска (в, г), полученные во время испытаний на износ по схеме «штифт–диск»

Сравнение результатов испытаний на изнашивание показало, что и в случае использования метода микроцарапания, и в случае использования испытаний на износ по схеме "штифт–диск" наибольшая интенсивность изнашивания наблюдалась на образцах, термообработанных в условиях № 1 и № 2 (при использовании закалки в жидком азоте и выдержки в нем в течение 24 часов после отпуска). При этом наблюдается четкая корреляция между сопротивлением царапанию алмазной иглой и сопротивлением износу при скольжении стали.

Кроме того, установлено, что наилучшей износостойкостью обладают образцы, которые подвергались криогенной закалке сразу после закалки в масле.

Меньшие «лыски износа» на образцах, подвергнутых криогенной закалке, свидетельствуют о наличии большего количества мелкодисперсной упрочняющей твердой фазы, выделившейся в стали Х12М. Упрочнение материала на микро- и макроуровнях обычно снижает пластичность и усиливает износостойкость.

В целях установления эффективности способов различных схем термообработки результаты измерений величин интенсивности изнашивания, твердости, энергии ударного разрушения были нормированы по отношению к аналогичным величинам, полученным для основного способа обработки № 1 (принятым за 100%) (рис. 5).

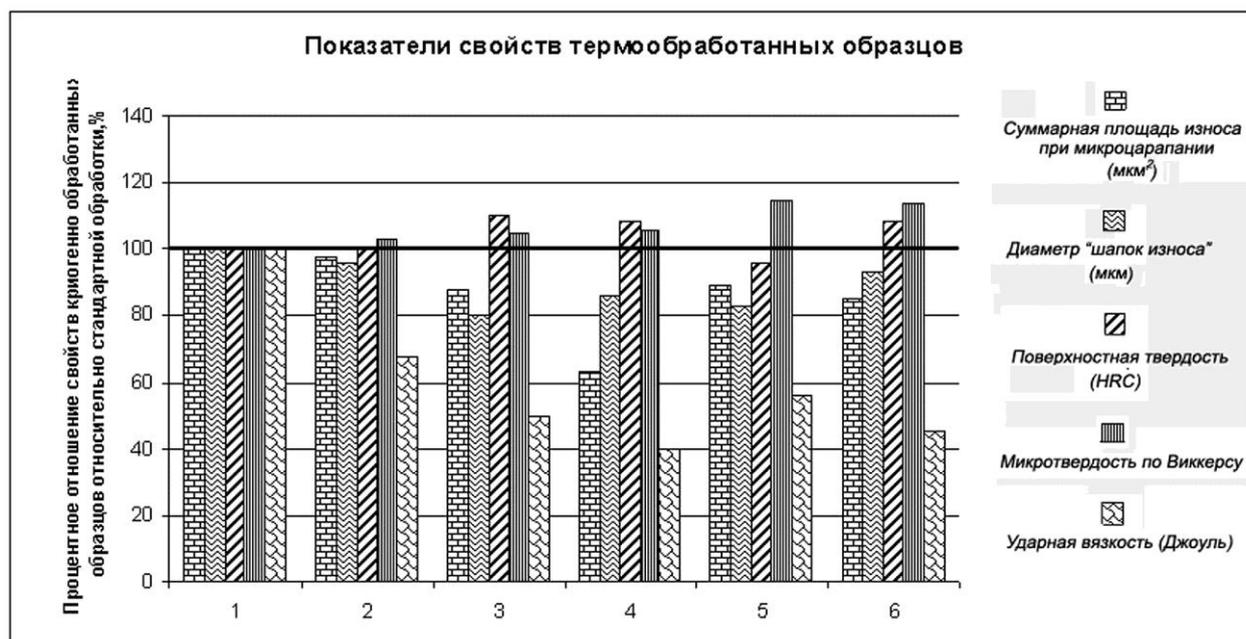


Рисунок 5 - Соотношения значений интенсивности изнашивания, ударной вязкости и твердости образцов, подвергнутых криогенной обработке, нормированных по отношению к образцам, подвергнутым стандартной термообработке (условия № 1)

Анализ результатов нормирования испытаний показал, что для повышения износостойкости использование криогенной обработки является наиболее эффективными в том случае, если она применяется после закалки в масле, а не после отпуска.

Результаты испытаний показали, что при увеличении продолжительности выдержки в криогенной ванне с 0,5 часа (условия № 3) до 24 часов (условия № 4 и № 5) износостойкость и твердость повышаются, но при этом ударная вязкость снижается. Это свидетельствует о том, что воздействие низких температур при последующем отпуске может вызывать на ранних стадиях старения формирование более мелкодисперсных карбидных фаз, чем при обычной термообработке.

Двадцатичетырехчасовой промежуток между закалкой в масле и обработкой в жидком азоте (условия № 5) ограничивает влияние последующей криогенной обработки за счет старения стали при комнатной температуре.

## Выводы

1. Эксперименты подтвердили, что результатом криогенной обработки является умеренное увеличение износостойкости и твердости за счет снижения ударной вязкости.

2. Для наибольшей эффективности криогенная обработка должна проводиться до отпуска в ближайшее время после закалки.

3. При последующих исследованиях необходимо сосредоточить внимание на эффекте старения при комнатной температуре перед криогенной закалкой.

### **Список использованных источников**

1. Case-hardened stainless steel bearing component and process [Текст] / пат. США 5.851.313 / D.L Milam; опубли. 22.12.1998.

2. Bourne, G.R. Effects of Cryogenic Treatment on Wear Resistance of AISI D2 Tool steel [Текст]: STLE Annual Meeting 2003, Tribology Laboratory, Univ. of Florida.

3. Meng, F. Role of eta-carbide precipitations in the wear resistance improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C tool steel cryogenic treatment [Текст] /F. Meng, Fanju // ISIJ International – 1994. – V 34, № 2. P. 205 – 210.

4. Das, D Influence of temperature of sub-zero treatments on the wear behaviour of die steel [Текст] / D. Das, K.K. Ray, A.K. Dutta // Wear – 2009. – Vol. 267, Issues 9 – 10. P. 1361–1370.

5. Lal, D Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels [Текст] /D. Mohan Lal, S Renganarayanan, A Kalanidhi // Cryogenics – 2001. – V. 41, Issue 3. P. 149 –155.

6. Huang, M. Study on Cryogenic Phase Change and Wear Characteristics of High SpeedSteel. [Текст] / M.C. Huang, // Acta Metallurgica Sinica (English Letters) – 2003. – V. 16, № 6. P 524–530.

7. Huang, J. Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel [Текст] / J.Y Huang , Y.T Zhu, X.Z Liao, I.J Beyerlein, M.A Bourke, T.E Mitchell // Materials Science and Engineering – 2003. – V. 339, Issues 1–2. P. 241–244.

8. Yoshino, Y. Vickers hardness properties of structural materials for superconducting magnet at cryogenic temperatures [Текст] /Y. Yoshino , A Iwabuchi, R Onodera, A Chiba, K Katagiri, T Shimizu // Cryogenics – 2001. – V. 41, Issue 7. P 505 – 511.

*Поступила в редакцию 25.04.2016.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*