

**ЛЕБЕДЕВА НАДЕЖДА ВАЛЕРЬЕВНА**

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ  
ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ ИЗ СТАЛЕЙ С  
РЕГУЛИРУЕМЫМ АУСТЕНИТНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ ПРИ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Специальность 05.02.01 – Материаловедение (машиностроение)**

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидат технических наук**

**Санкт-Петербург**

**2005**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный Морской  
Технический Университет»

**Научный руководитель:**

Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук,  
профессор **Солнцев Юрий Порфирьевич**

**Официальные оппоненты**

доктор технических наук,  
профессор **Шахназаров Юрий Варданович**

кандидат технических наук,  
**Соколов Вячеслав Иванович**


Ведущая организация:  
ОАО "Завод Красный Выборжец"

Защита состоится « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005г. в \_\_\_\_\_ ч на заседании диссертационного  
совета Д 212.229.19 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический  
университет» по адресу: 195251, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая, 29

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-  
Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Востров В.Н.

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы** Технический процесс в развитии отраслей машиностроения и энергетической промышленности в последние годы предъявляет весьма высокие требования к качеству и повышению стойкости инструментов для обработки труднодеформируемых материалов, наряду со снижением их стоимости. Существующие традиционные стали для горячего прессования уже не могут в полной мере удовлетворять этим требованиям. Поэтому во всем мире проводятся работы по изысканию новых и улучшению качества и свойств таких сталей, а также поиск оптимальных и более совершенных способов и технологий их получения и обработки, в том числе оптимизации состава, выплавки,ковки, термической и механической обработки. Различные, а и иногда противоречивые требования, предъявляемые к сталям и сплавам для формообразующего инструмента (высокие разгаростойкость, теплостойкость, трещиностойкость, износостойкость и др.) породили многообразие инструментальных материалов, режимов их обработки и упрочнения. Это затрудняет работу предприятий, в том числе и в металлургической и обрабатывающей отраслях.

Среди процессов точного формообразования заготовок ведущее место занимает прессование. Этот процесс совершенствовался в направлении увеличения мощности и быстроходности оборудования, непрерывно возрастал объем обработки трудно деформируемых сплавов. При этом значительно ужесточились температурно-силовые условия эксплуатации инструмента, при которых температуры разогрева поверхностных слоев достигают 800-900°C и выше; удельные давления во многих случаях составляют 1500-2000 МПа.

Создание штамповых сталей, способных обеспечивать высокую стойкость инструмента при таких экстремальных нагрузках, относится к числу наиболее сложных металлургических проблем. Ранее применявшиеся в промышленности стали (5ХНВ, 4ХМФС и др.) имели низкую теплостойкость и были предназначены для работы при температурах до 500-550°C. Впоследствии были разработаны стали, обеспечивающие высокую стойкость инструмента, работающего при температурах до 680-700°C (3Х2В8Ф, 3ХВ4СФ). Этот температурный уровень оказался предельным для штамповых сталей на ферритно-перлитной основе. Даже наиболее теплостойкие из них при нагреве выше 700°C интенсивно разупрочняются, что является основной причиной выхода инструмента из строя. Поэтому для производства прессового инструмента были предложены стали с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации (стали с РАПЭ). Особенностью сталей этого класса является то, что в процессе эксплуатации (или за счет предварительного подогрева) стали претерпевают  $\alpha$ - $\gamma$  превращение и устойчиво сохраняют аустенитную структуру при рабочих температурах, что и определяет основное преимущество сталей с РАПЭ перед используемыми сталями на ферритной основе – благодаря способности металлов с гранецентрированной

решеткой наклепываться в большей степени, чем металлы с объемноцентрированной решеткой

Поверхностный слой инструмента из стали данного класса способен упрочняться под воздействием рабочих давлений, создаваемых прессуемой заготовкой непосредственно в процессе работы и сохранять такое упрочненное состояние при высоких температурах, сопровождающих прессование.

Разработка штамповых сталей высокой стойкости данного класса относится к числу важнейших направлений научно-исследовательских работ кафедры Материаловедения и Технологии материалов Государственного Морского Технического Университета. Настоящая работа является продолжением и развитием этих исследований.

**Цель работы.** Целью настоящей работы являлась оптимизация химического состава стали, разработка технологии и изготовление из нее опытных матриц для прессования медных сплавов. В представленной работе для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- определены условия эксплуатации и выработаны требования, предъявляемые к сталям, применяемым для сложных температурных условий деформации;
- проведен анализ используемых в настоящее время штамповых сталей, применяемых для работ при высоких температурах, исследованы причины их недостаточной стойкости и несоответствия современным требованиям;
- проведены исследования влияния легирующих элементов на прочностные свойства сталей с регулируемым аустенитным превращением и их склонность к упрочнению в аустенитном состоянии;
- проведена оптимизация химического состава и разработана новая сталь для прессового инструмента для горячего прессования труднодеформируемых сплавов цветных металлов;
- разработана технология и изготовлена опытная партия матриц для горячего деформирования и проведены промышленные испытания стали при прессовании прутков и труб из медных и медно-никелевых сплавов;

**Научная новизна.** Разработана штамповая сталь, микролегирующая азотом, для изготовления прессового инструмента, на состав стали и технологию ее производства подана заявка на патент (№2004121229 от 12.06.2004). Исследовано влияние легирующих элементов на ее структуру и свойства. Определены факторы, влияющие на возможность дополнительного упрочнения аустенита. Впервые осуществлено микролегирование азотом сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации.

**Практическая значимость.** Изготовлено и проведено опытно-промышленное использование матриц из стали разработанного состава для горячего прессования труднодеформируемых цветных сплавов, показавшее более высокую стойкость по сравнению с ранее применявшимися сталями. Переход на применение матриц из новой стали позволит повысить их стойкость в 1,5-2 раза.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждались на научно-технических конференциях СПбГАХиПТ (2003г, 2004г), 6-ой Международной научно-технической конференции "Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике" (2004), семинаре "Актуальные проблемы прочности" (2004г), научно-технической конференции молодых специалистов ЦНИИ КМ "Прометей"(2004г).

**Публикации.** По материалам работы опубликовано 6 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы. Объем работы составляет 165 страниц, включая 44 рисунка и 12 таблиц. Список литературы содержит 160 наименований.

## **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведена структура и объем работы. Также рассмотрены проблемы использования азота в штамповых сталях с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации.

**Литературный обзор.** Специфическими особенностями технологии процесса прессования труднодеформируемых медных сплавов являются:

- высокие температуры разогрева поверхностных слоев инструмента (до 600-750°C при исходной температуре слитка 800°C) и большой перепад температур от поверхности в глубину инструмента;

- высокие давления на поверхностные слои инструмента - могут колебаться от до 300 – 500 МПа, возрастая в 1,5 – 3 раза в наиболее нагруженных участках гравюры вследствие концентрации напряжений;

- циклический характер теплового воздействия и изменяющихся напряжений.

Разрабатываемая сталь предназначена для прессового инструмента, испытывающего непосредственное соприкосновение с прессуемым слитком (в основном для матриц, игл и пресс-шайб), который подвергается воздействию термоциклических нагрузок.

Существует довольно большой диапазон сталей на ферритной основе, применяемых для изготовления прессового инструмента. При их работе используются механизмы карбидного или комплексного (карбиды+интерметаллиды) упрочнения. К достоинствам сталей на ферритной основе относятся сравнительно высокая теплостойкость и относительно низкая стоимость, но даже самые теплостойкие из них интенсивно разупрочняются при температурах выше 700°C и не обеспечивают необходимой стойкости инструментов. Для столь высоких температур в качестве инструментальных материалов более эффективно использование сталей с аустенитной кристаллической решеткой. Основным преимуществом сталей и сплавов этого класса является способность аустенитной структуры упрочняться под воздействием наклепа гораздо сильнее, чем материалы с другими структурами, что особенно важно при повышенных температурах эксплуатации. Однако, аустенитные стали имеют ряд недостатков, которые ограничивают области их применения: а) пониженную теплопроводность, высокий коэффициент теплового расширения и, как следствие, низкое сопротивление термомеханической усталости, что исключает возможность их применения при интенсивном охлаждении инструментов; б) плохую обрабатываемость резанием, поэтому во многих случаях их рационально использовать литыми.

Проанализированы причины выхода из строя инструментов, работающих в контакте с прессуемым изделием. Показано, что основными причинами износа инструментов является пластическая деформация калибрующего канала для сталей на ферритной основе и образование сетки разгарных трещин для аустенитных жаропрочных сталей и сплавов.

Разрабатываемая сталь относится к классу штамповых сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации (РАПЭ).

Устойчивая аустенитная структура при температурах эксплуатации определяет основное преимущество сталей с РАПЭ перед используемыми сталями на ферритной основе – из-за способности металлов с гранцентрированной решеткой наклепываться гораздо больше, чем металлов с объемноцентрированной решеткой. Поверхностный слой инструмента из сталей данного класса способен упрочняться под воздействием рабочих давлений, создаваемых прессуемым слитком непосредственно в период работы и сохранять такое упрочненное состояние при высоких температурах, сопровождающих процесс прессования. При этом стали с РАПЭ, имеющие при комнатной температуре ферритную структуру, позволяют избежать таких недостатков, свойственных сплавам аустенитного класса как плохой обрабатываемости.

Оценена возможность повышения работоспособности прессового инструмента путем его дополнительного упрочнения различными методами – дисперсными

частицами, пластической деформацией, фазовым наклепом и комплексом этих методов.

Рассмотрены возможности повышения стойкости инструментов из сталей с РАПЭ путем дополнительного микролегирования сталей азотом.

**Во второй главе** описана методика выплавки и исследования материала для прессового инструмента. Для исследований использовали металл промышленного производства. Опытные стали выплавляли в индукционной печи и разливали в слитки по 50 кг. Слитки ковали в прутки квадратного сечения со стороной квадрата 20 см. Прутки отжигали в электрической камерной печи по режиму: нагрев со скоростью 100-120°C/ч до температур 800-820°C, выдержка 3-3,5ч, охлаждение с печью до 250-300°C, нагрев до 550-600°C, выдержка 2-3 часа, охлаждение с печью до 200°C, затем на воздухе. Из прутков вырезали образцы для исследования структуры, физико-механических и технологических свойств.

Вследствие того, что основным свойством сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации является низкая температура фазовых превращений были проведены дилатометрические исследования и построены диаграммы изотермического превращения аустенита для опытных сталей.

Были проведены испытания механических свойств при комнатных температурах и температурах эксплуатации, а также микроструктурные исследования и оценка упрочнения сталей при температурах выше температуры  $\alpha$ - $\gamma$  превращения. Схемы механических испытаний при повышенной температуре, которые проводились по методике ГОСТ 9651-84 на стандартных разрывных образцах тип IV №7 по ГОСТ 1497-84 на испытательной машине ИМ-4Р после предварительной термической и термомеханической обработки, представлены на рис.1.

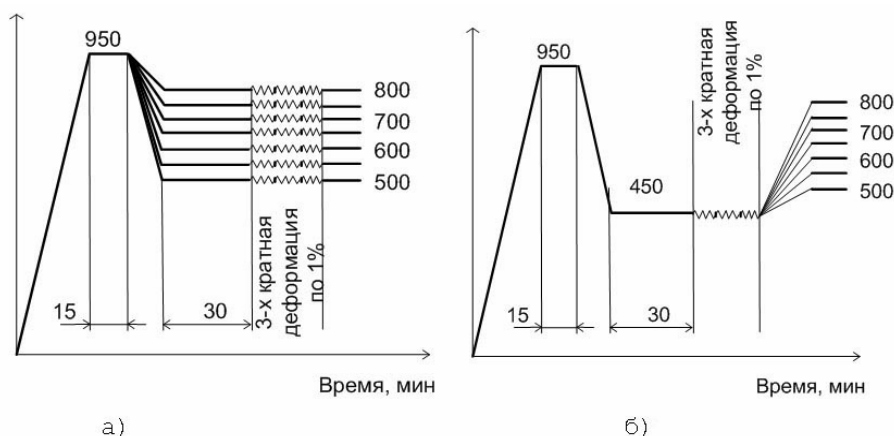


Рис. 1 Схемы предварительной обработки опытных сталей.

Образцы нагревали в среде аргона в камере испытательной машины до температуры аустенитизации. Выдерживали до полного завершения превращения. Дальнейшая предварительная обработка осуществлялась по 2-х схемам:

а – моделирующая условия эксплуатации – выдержка при высоких температурах с пластической деформацией, имитирующей процесс прессования;

б – определяющая предварительную упрочняющую обработку – охлаждение до температур ~ 400-450°C, пластическая деформация при этой температуре и нагрев до температур эксплуатации.

В структурных исследованиях использовались микроскопы Neophot-32 и Unimet, рентгеновский дифрактометр ДРОН-2 04, высокоскоростной дилатометр DIM8000, высокотемпературный микроскоп АЛАТОО, просвечивающий электронный микроскоп JEM-200.

**В третьей главе** проведен анализ влияния легирующих элементов на механические свойства при температурах эксплуатации, температуру  $\alpha\text{-}\gamma$  превращения штамповых сталей и диапазон температур устойчивого аустенитного состояния.

Устойчивость переохлажденного аустенита в диапазоне температур 400-600°C в наибольшей степени повышают молибден, хром и никель. В зависимости от

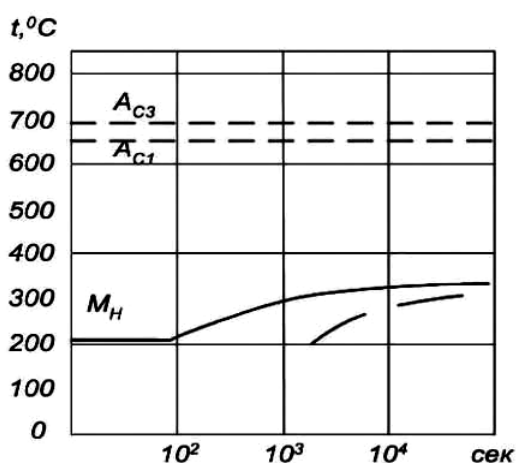


Рис. 2 Диаграмма изотермического превращения стали с содержанием  $N\sim 0.03\%$ ,  $Ni\sim 5.5\%$ ,  $Mo\sim 2.2\%$ ,  $V\sim 1.3\%$ .

концентрации углерода и этих элементов можно получить диаграммы, имеющие либо три области превращений - перлитную, бейнитную и мартенситную, либо две области - бейнитную и мартенситную. С точки зрения требований к сталям с РАПЭ более предпочтительным является второй вид диаграммы. Для опытных сталей построены диаграммы изотермического распада аустенита, из которых видно, что стали обладают высокой устойчивостью переохлажденного аустенита в перлитной области температур (рис.2). Это обусловлено повышенным содержанием никеля, хрома и молибдена в аустените. Устойчивость переохлажденного аустенита в бейнитной области значительно снижается.

Наибольшее внимание было уделено изучению влияния легирующих элементов на механические свойства и на процессы упрочнения сталей при температурах эксплуатации. Установлено, что введение ванадия в количестве до 0,5% в низкоуглеродистые Cr-Ni-Mo-V стали не оказывает существенного влияния на изменение механических свойств. В сталях с более высоким содержанием углерода (0,40-0,46%) отмечено благоприятное воздействие ванадия на характеристики пластичности. Это связано, очевидно, с модифицирующим воздействием ванадия на структуру в исходном литом состоянии и последующим "наследованием" более



однородной структуры в горячедеформированном состоянии. При наличии в стали даже в небольшом количестве азота повышение содержания ванадия ведет к повышению прочностных свойств за счет образования карбонитридов, при этом относительное удлинение и относительное сужение практически не изменяются.

Также показано, что легирование азотом и ванадием (как карбонитридообразующим элементом) позволяет использовать для повышения высокотемпературной прочности опытных сталей не только упрочнение за счет процессов, происходящих при пластической деформации, но и за счет механизмов дисперсионного упрочнения.

Оценка микроструктур опытных сталей без азота и легированных азотом до 0,04%, полученных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, показала, что после аустенитизации и выдержки образцов при температурах 600-750°C в сталях, легированных азотом и ванадием > 1,0% происходит выделение дисперсных частиц упрочняющих фаз - карбонитридов ванадия, за счет образования которых предел текучести при температурах ~700°C повышается на 15-20% по сравнению со сталями без азота, в которых наблюдаются в основном крупные нерастворившиеся карбиды.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что для повышения работоспособности прессового инструмента, изготовленного из сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации можно проводить оптимизацию их состава при содержании легирующих элементов в следующих пределах: С – 0,35-0,55; Si – 0.3-0.7; Mn – 0.3-0.7; Ni – 4-6; Cr – 1.0-3.0; V – 0.5-2.0; N – до 0,04; Mo – 1.0-3.5. Таким образом, для достижения поставленной цели найден интервал легирования, который обеспечивает широкий температурный диапазон устойчивого аустенитного состояния.

**В четвертой главе** проведена оптимизация химического состава стали для прессового инструмента горячего деформирования цветных сплавов с использованием методов математической статистики по принципу "компромисса". При этом предусматривали достижение максимальных значений параметров оптимизации и свойств, лимитирующих эксплуатационный ресурс инструмента, при сохранении остальных характеристик на необходимом уровне, обеспечивающем требуемую прочность инструмента.

На основании аналитических исследований корреляционных зависимостей между основными и эксплуатационными свойствами штамповых сталей для прессового инструмента был выбран легирующий комплекс с варьируемым содержанием С, V, N, Mo и постоянном содержании Cr, Ni, Si, Mn, которое поддерживали на заданном уровне (средние значения содержания элементов - [Cr]~2,2%, [Si]~0.4%, [Mn]~0.6%, [Ni]~5.0%). Выбор легирующего комплекса

произведен на основании литературных данных и проведенных исследований по влиянию легирующих элементов на технологические свойства стали.

Основной уровень и пределы варьирования остальных элементов (C, N, V, Mo) выбирались с учетом зависимостей растворения азота в сталях и получения карбонитридов ванадия.

В качестве параметра оптимизации была выбрана разница между пределом текучести, определенном при испытаниях по схеме а – без деформации и по схеме б - с 3-х кратной деформацией по 1% при 400<sup>0</sup>С (см. рис.1), как величина, определяющая степень упрочнения аустенитной структуры при температурах эксплуатации. В качестве факторов оптимизации приняты концентрации 4-х компонентов сплава.

Для получения уравнений регрессии «состав - свойства» исследовали опытные стали, химический состав которых в матрице планирования был задан с использованием ½ реплики от полного факторного эксперимента типа 2<sup>4</sup> (табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Факторы		C	N	V	Mo
Основной уровень	$x_i$	0,4	0,03	1,1	1,4
Интервал варьирования	$\Delta x_i$	0,1	0,02	0,5	1,0
Верхний уровень	$x_i=+1$	0,5	0,05	1,6	2,4
Нижний уровень	$x_i=-1$	0,3	0,01	0,6	0,4

В качестве целевой функции для оптимизации взяли функцию изменения предела текучести при испытаниях при температуре 700<sup>0</sup>С, которая в натуральном масштабе после оценки коэффициентов линейного уравнения регрессии имела следующий вид:

$$\Delta\sigma_{0,2}=42+10[C]+160[N]+ 8[V]+2[Mo]$$

Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные результаты, так как вычисленное расчетное значение критерия Фишера  $F_p=2,78$  меньше критического табличного для  $f_1=N-k-1=3$  и  $f_2=N(r-1)=16$  степеней свободы (где N- количество опытов, k – количество факторов; r – число экспериментов) и 5%-ного уровня значимости  $F_{0,05}(3,16)=3,24$

В целях обеспечения достаточной прочности при определении максимума целевой функции приняты следующие ограничения механических свойств:

- при 20<sup>0</sup>С  $\sigma_{0,2} \geq 1550$ МПа;
- при 700<sup>0</sup>С  $\sigma_{0,2} \geq 350$ МПа;
- $A_{c1} \leq 700^0$ С,

для которых с помощью регрессионного анализа получены неравенства, принятые за ограничения при оптимизации.

Таким образом, уравнения регрессии, найденные для ограничивающих условий позволили свести задачу оптимизации к отысканию таких неотрицательных переменных  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , удовлетворяющим неравенствам:

$$150 x_1 + 860 x_2 + 25 x_3 + 15 x_4 \geq 120;$$

$$45 x_1 + 12 x_2 + 4 x_3 - x_4 \leq 20;$$

$$-20 x_1 - 280 x_2 + 2 x_3 + 10 x_4 \leq 40;$$

при которых линейная функция этих переменных

$$Y = 40 + 10 x_1 + 160 x_2 + 8 x_3 + 2 x_4$$

обращалась бы в максимум.

Решением этой задачи методом последовательного компромисса получен химический состав, обеспечивающий достижение максимальных значений параметра оптимизации при указанных ограничениях. Расчетные значения свойств стали сопоставимы с экспериментальными, полученными на металле лабораторной выплавки (прутки сечением 40x40 мм из слитка массой 50 кг).

С учетом возможностей современного сталеплавильного производства предлагается следующий химический состав стали:

C	Si	Mn	Ni	Cr	V	N	Mo
0,36-0,40	0,3-0,6	0,6-0,8	5,0-5,5	2,2-2,4	1,3-1,6	0,03-0,04	2,2-2,5

Твердость опытной стали после закалки от 1100°C с охлаждением в масле в зависимости от температуры отпуска и механические свойства при различных температурах и схемах испытаний приведены в главе 5. Они показывают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что свидетельствует о правомочности принятых в расчетах допущений.

**Пятая глава** диссертации посвящена исследованию опытной стали марки 4X2H5M2AФ2, химический состав которой был определен в предыдущей главе.

Были исследованы структурные и фазовые превращения, протекающие при нагреве и охлаждении стали. Фазовые превращения при нагреве определяются положением критических точек стали. Сталь 4X2H5M2AФ2 имеет следующие значения критических температур

$$A_{C1} = 650^\circ\text{C}; A_{C3} = 735^\circ\text{C}$$

Изучение кинетики роста зерна показало, что при температурах нагрева до 1000°C стали сохраняют мелкозернистую структуру со значительным количеством нерастворившихся карбидов и карбонитридов. В первую очередь происходит растворение карбонитридов  $V(\text{CN})$ , в которых часть атомов ванадия заменена атомами хрома. Об этом свидетельствует резкое уменьшение содержания хрома в частицах, оставшихся после закалки с температур 950°C и выше.

Температуру аустенитизации 1050°C можно считать максимально допустимой для стали 4X2H5M2AФ2. После закалки с этой температуры зерно укрупняется до 7-ого балла по шкале ГОСТ 5639-82.

Высокая устойчивость переохлажденного аустенита в перлитной и промежуточной областях температур является важнейшим и необходимым условием, регламентирующим возможность применения стали для работы в аустенитном состоянии. Сталь обладает высокой устойчивостью переохлажденного аустенита в перлитной области температур: превращение не наблюдается даже после выдержки в течение 10ч. Это обусловлено повышенным содержанием никеля, хрома и молибдена в аустените, а также положительным влиянием микролегирования азотом. Бейнитное превращение обнаруживается при температурах 300-350°C и скоростях охлаждения до 10 град/мин. Таким образом, температура 350°C является нижней границей диапазона температур, в пределах которого стали могут длительное время работать в аустенитном состоянии, не претерпевая  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения.

Были выполнены исследования, направленные на определение оптимальных режимов термообработки стали 4X2H5M2AФ2.

Для поковок из исследуемой стали рекомендован двукратный режим отжига: нагрев до температур 850-880°C, выдержка 2-3 ч; охлаждение на воздухе до 350-300°C, выравнивание температуры; нагрев до температур 650-680°C, выдержка 5-6 ч; охлаждение с печью до 400°C, а затем на воздухе.

Твердость стали после такого режима не превышает HB280. В таком состоянии сталь удовлетворительно обрабатывается резанием и можно проводить ее механическую обработку.

Анализ структуры образцов после закалки и отпуска показывает, что по мере повышения температуры нагрева постепенно усиливается структурная неоднородность.

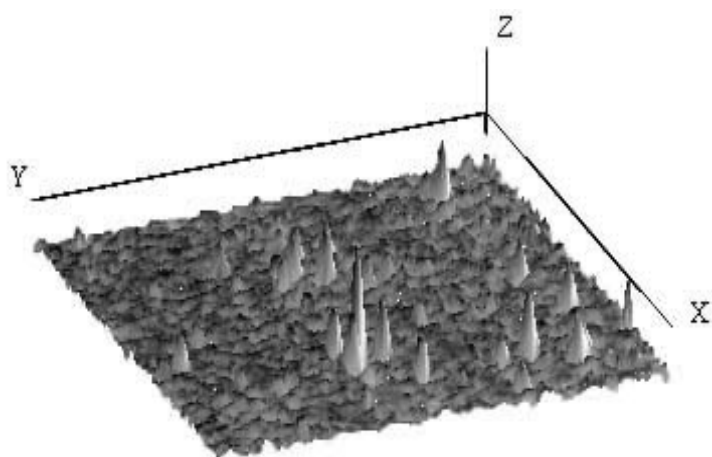


Рис. 4 Изменение модуля упругости поверхности при наличии карбонитридов ванадия

Наряду с участками высоко отпущенного мартенсита с крупными карбидными включениями, появляются и занимают большую площадь участки вновь образовавшегося бейнита. Закалка при 1000°C в масле и последующий отпуск при 700°C обеспечивают наиболее высокие значения пластичности и ударной вязкости.

Сталь 4X2H5M2AФ2 обладает достаточными

прочностными свойствами в аустенитном состоянии, а также высокой способностью к упрочнению в аустенитном состоянии. Так при 750°C  $\sigma_{0,2}$  достигает 360МПа, а при упрочнении стали в интервале температур 400-500°C повышается до 410МПа. При этом характеристики пластичности остаются на высоком уровне –  $\delta_5 \sim 35\%$ ;  $\psi \sim 65\%$ .

Исследования стали после упрочняющей обработки, проведенные на атомно-силовом микроскопе "NanoScan" (рис.4) показали наличие в структуре материала мелких частиц, предположительно карбонитридов ванадия, размером  $\sim 80-100$  нм, с модулем упругости, превышающим основной на  $\sim 60-65\%$ . Эти частицы обеспечивают повышение прочностных свойств разработанной стали по сравнению с известной сталью 4X2H5M3K5Ф.

**В шестой главе** по результатам проведенных исследований были проведены опытно-промышленные испытания новой штамповой стали 4X2H5M2AФ2 на заводе "Красный Выборжец". Выплавка и ковка стали 4X2H5M2AФ2 освоены на предприятии ООО «Ижорские заводы».

Освоены технологические режимы упрочняющей обработки матриц из стали 4X2H5M2AФ2. При этом исходили из следующего:

1. Наибольший эффект упрочнения и повышенная термическая стабильность упрочненного состояния достигаются в том случае, если первые циклы многократной пластической деформации аустенита осуществляются в интервале температур 400-500°C.

2. Упрочняющая обработка должна исключать последующую механическую обработку и обеспечивать заданные геометрические размеры матриц.

При данных условиях с использованием имеющегося прессового оборудования возможны две технологические схемы упрочнения.

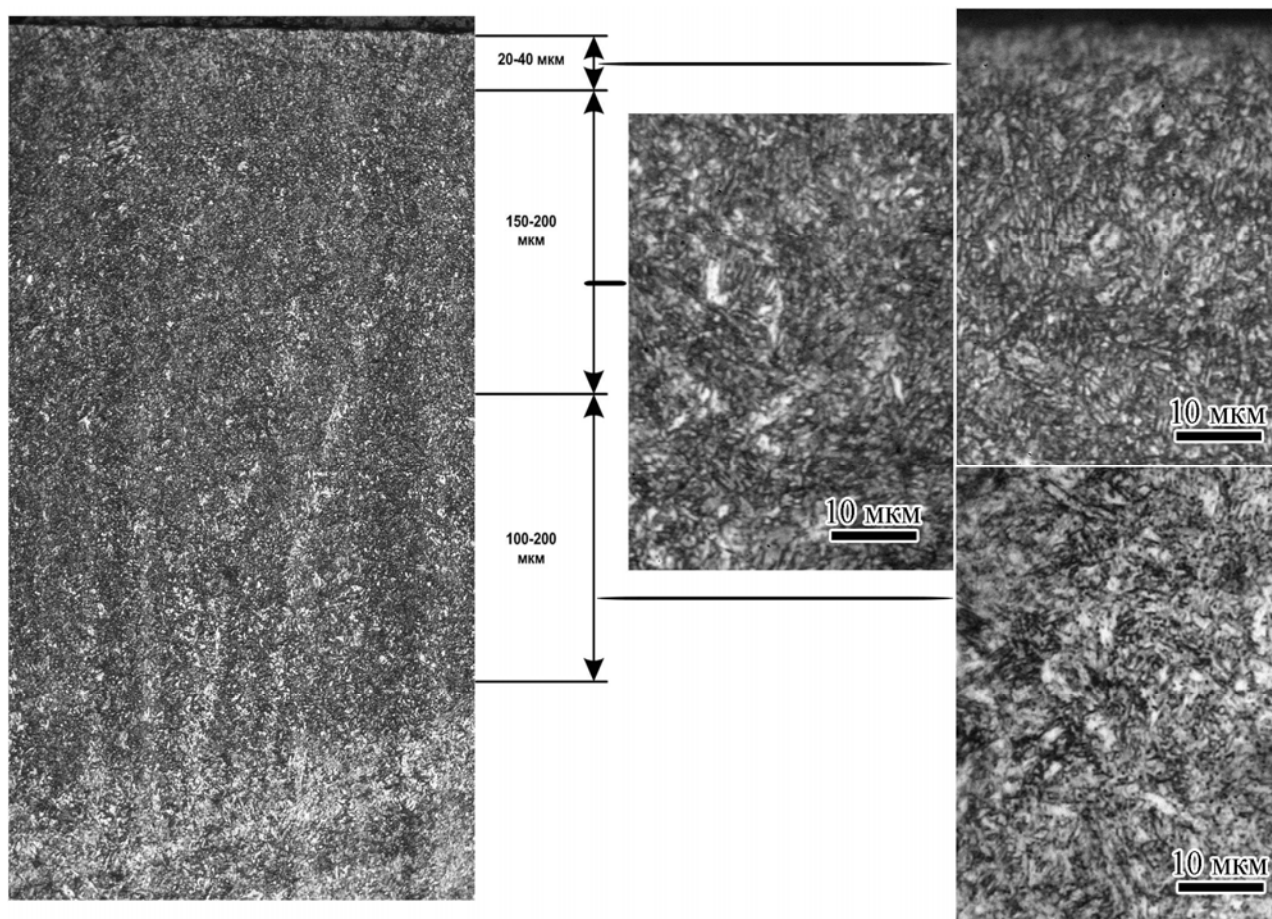
При обработке по первой схеме подвергнутые окончательной механической обработке матрицы, диаметр калибрующего отверстия которых выполняли по верхнему допуску на размер, нагревали до температуры 930°C, выдерживали 10-15 мин, охлаждали на воздухе до 350-400°C, затем устанавливали на пресс и производили прессование слитков.

В течение первых 5-8 циклов температура матрицы постепенно повышается за счет тепла прессуемых слитков и выходит на рабочий режим. Далее размеры матрицы стабилизируются и наступает сравнительно длительный период эксплуатации инструмента. Такой режим упрочняющей обработки, осуществляемый непосредственно при эксплуатации инструмента весьма прост в осуществлении и не требует какой-либо специальной оснастки.

Основным недостатком рассмотренной технологии упрочняющей обработки инструмента из стали 4X2H5M2AФ2 является то, что практически невозможно управлять степенью деформации за каждый цикл. При прессовании некоторых

труднодеформируемых медных сплавов вызываемое пластической деформацией уменьшение размера (заплывание) калибрующего отверстия может опережать процесс упрочнения стали. Это обуславливает необходимость расточки матриц. Этот недостаток практически устраняется при использовании второй технологической схемы упрочнения, которая предусматривает многократную пластическую деформацию с помощью специальных пуансонов. Целью такой деформации является упрочнение аустенита обеспечение заданных размеров инструмента перед началом его эксплуатации. Для обеспечения заданной степени деформации матрицы изготавливают с припуском на обжатие. При расчете величины припуска необходимо связать переменные размеры матрицы с задаваемой степенью деформации.

Для поддержания температурного режима матриц циклы деформирования следует чередовать с циклами прессования слитков. Реализация этого режима (второго) упрочнения в производственных условиях не связана с какими-либо технологическими трудностями.



*Рис.4 Структура поверхностного слоя матрицы из стали 4Х2Н5М2АФ2*

Выводы о структурных и фазовых превращениях, которые протекают в стали при нагреве до рабочих температур косвенно сделаны по результатам исследования микроструктуры и твердости по сечению инструмента после эксплуатации.

Стойкость инструмента в значительной степени зависит от свойства тонкого поверхностного слоя, непосредственно воспринимающего циклические тепловые и механические нагрузки при прессовании. На рис.4 приведена структура этой зоны.

К рабочей поверхности примыкает слой глубиной 20-40 мкм, по структуре состоящий из мартенсита и остаточного аустенита до 30%. При эксплуатации этот слой имел аустенитную структуру и подвергался многократному микропластическому деформированию.

Можно предположить, что возникающее при этом упрочненное (наклепанное) состояние аустенита обладает повышенной термической стабильностью и во многом предопределяет высокую стойкость инструмента. Это подтверждается и тем фактом, что после охлаждения на воздухе, несмотря на повышенное содержание: остаточного аустенита, слой сохраняет очень высокую микротвердость - до 1100кгс/мм<sup>2</sup>.

Далее следует слой глубиной 150-200мкм с дисперсной мартенситной структурой и высоким содержанием избыточных фаз (микротвердость слоя 750-820 кгс/мм<sup>2</sup>). Структура этого слоя при эксплуатации матриц - аустенит, упрочненный выделившимися карбонитридами. Можно предположить, что такая структура имеет достаточно высокую горячую твердость и способствует тому, что рассмотренный выше поверхностный слой не сминается и не уносится в процессе эксплуатации.

И, наконец, третий от рабочей поверхности слой глубиной 100-200мкм имеет мартенситную структуру с участками остаточного аустенита. Микротвердость этого слоя 680-750 кгс/мм<sup>2</sup>. Естественно, что при эксплуатации он также имел аустенитную структуру и являлся как бы переходным от рассмотренных выше упрочненные поверхностных слоев к более глубоким слоям, также имеющим аустенитную основу, но не подверженным заметному упрочнению за счет рабочих температурно-силовых нагрузок.

Исследование основных физико-механических свойств и разработка режимов термической и механико-эксплуатационной обработки стали 4Х2Н5М2АФ2 позволили использовать эту сталь на заводе "Красный Выборжец" для изготовления матриц для прессования трудно-деформированных медных сплавов.

В табл. 2 приведены сравнительные данные по разовой (до переточки) стойкости матриц на горизонтальном гидравлическом прессе с усилием 15МН из сталей 4Х2Н5М2АФ2, 4Х2Н5М3К5Ф и 3Х2В8Ф.

Показано, что сталь 4Х2Н5М2АФ2 имеет значительное преимущество по сравнению со штамповыми сталями, используемыми в качестве прессового инструмента в настоящее время. Особенно существенное повышение стойкости наблюдается при прессовании меди и таких труднодеформируемых сплавов, как БрАЖН10-4-4 и Л63. В этом случае стойкость матриц повышается в 5-10 раз по сравнению со сталью 3Х2В8Ф и в 1,5-2 раза по сравнению с ранее используемой

сталью 4X2H5M3K5Ф. Еще более значительное повышение стойкости наблюдается при второй установке матрицы после переточки.

Таблица 2

Сравнительные данные по разовой стойкости матриц

Прессуемый сплав	Размеры изделия, мм	Размеры слитка	Количество прессовок до переточки матриц из		
			стали на ферритной основе	стали с РАПЭ	
			3X2B58Ф	4X2H5M3K5Ф	4X2H5M2AФ2
Медь	Ø 25	Ø 175x250	5-10	125	240
	26x32	Ø 175x350		100	165
Л63	Ø 32	Ø 175x350	10-15	50	82
	Ø 39	Ø 175x350		40	80
	26x33	Ø 175x250		120	238
	30x34	Ø 175x200		100	170
БРАЖН10-4-4	Ø 25	Ø 175x250	4-8	50	86
	Ø 42	Ø 200x450		30	74

К тому же необходимо отметить, что матрицы из стали 4X2H5M2AФ2 по сравнению с другими используемыми марками сталей могут быть подвергнуты большему количеству переточек до окончательного выхода из строя.

Экономический эффект от увеличения длительности эксплуатации инструмента при внедрении стали 4X2H5M2AФ2 на заводе "Красный Выборжец" составил ~ 45% по сравнению с используемыми в настоящее время штамповыми сталями.

### Выводы

1. На кафедре Материаловедения и Технологии материалов Государственного Морского Технического Университета был разработан новый класс штамповых сталей для прессового инструмента – стали с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации (РАПЭ). Представленная работа является продолжением и развитием этих исследований с целью повышения стойкости инструмента из сталей этого класса за счет оптимизации химического состава и активизации механизмов дисперсионного твердения при дополнительном легировании сталей азотом и ванадием.

2. Исследованы штамповые стали для прессового инструмента с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации. С использованием методов планирования эксперимента и математической статистики проведена оценка влияния легирующих элементов на механические свойства сталей данного



класса при температурах эксплуатации. Построены расчетные уравнения регрессии и обнаружены оптимальные области химического состава, позволяющего получить требуемый комплекс свойств и необходимую степень упрочнения при эксплуатации стали, дополнительно легированной азотом.

3. Разработана новая азотсодержащая штамповая сталь 4X2H5M2AФ2, имеющая следующий оптимизированный состав: С - 0,36-0,4%; Si – 0,3-0,5%; Mn – 0,6-0,8%; Ni – 5-5,5%; Cr – 2-2,4%; V – 1,2-1,4%; N – 0,03-0,04 %; Мо – 2,2-2,5%. По сравнению с ранее разработанной сталью 4X2H5M3K5Ф из ее состава исключен дефицитный и дорогой кобальт и дополнительно проведено микролегирование азотом.

4. Исследованы микроструктура и механические свойства стали, изучены особенности фазовых превращений в интервале температур от комнатных до температур эксплуатации. Изучена возможность использования механизмов деформационного и дисперсионного упрочнения для повышения прочности прессового инструмента в процессе его эксплуатации. Показана эффективность воздействия карбонитридов на свойства стали при сочетании двух механизмов упрочнения. При температуре аустенитизации в раствор переходит достаточное количество карбонитридообразующего элемента, но некоторое количество фазы должно остаться нерастворенной для создания эффективных барьеров, тормозящих рост зерна.

5. Производство стали освоено на ООО "Ижорские заводы" Выплавка, ковка и механическая обработка стали не связаны с какими-либо технологическими трудностями. Разработан режим двойного отжига для поковок из стали 4X2H5M2AФ2. Разработаны два технологических режима упрочняющей обработки инструмента из стали 4X2H5M2AФ2 в аустенитном состоянии. Первый режим предусматривает аустенитизацию стали и последующее деформационное упрочнение тонкого поверхностного слоя инструмента за счет усилий, возникающих непосредственно в процессе эксплуатации инструмента (механико-эксплуатационное упрочнение). Второй режим предусматривает аустенитизацию и последующее деформационное упрочнение стали путем многократной пластической деформации рабочей зоны матрицы при помощи специальных пуансонов. При выполнении обоих режимов деформационное упрочнение следует начинать в интервале температур 400-500°С.

6. Показано, что низкая стойкость матриц из стали 3X2B8Ф обусловлена интенсивным протеканием процессов отпуска уже при первых циклах прессования. Сталь 4X2H5M2AФ2, в отличие от стали 3X2B8Ф, под воздействием эксплуатационных тепловых и механических нагрузок упрочняется в тонкой поверхностной зоне. Это обеспечивает повышение стойкости матриц в 3-5, а в отдельных случаях и в 10 раз. Повышение стойкости матриц из стали 4X2H5M2AФ2 по сравнению с известной сталью 4X2H5M3K5Ф связано с

активизацией механизма дисперсионного твердения, обусловленного легированием стали азотом и ванадием.

7. Сталь 4X2H5M2AФ2 рекомендуется для применения в качестве материала для тяжело нагруженного прессового инструмента - матриц, игл, пресс-шайб – при прессовании труднодеформируемых сплавов цветных металлов – в особенности латуней, бронз, медно-никелевых сплавов. Экономический эффект от увеличения длительности эксплуатации инструмента при внедрении стали 4X2H5M2AФ2 предполагается до 25% по сравнению с используемыми в настоящее время штамповыми сталями.

### **Публикации:**

1. Лебедева Н.В. Современные штамповые стали для горячего прессования. //Балтийские металлы, 2003, №1. С.7-9.

2. Лебедева Н.В., Солнцев Ю.П. Стали для прессового инструмента /В сб. трудов 9-й научно-технической конференции "Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов" – С-Пб.: СПбГАХиПТ, 2003.С.82-85

3. Лебедева Н.В. Оценка возможности комплексного упрочнения азотсодержащих сталей для прессового инструмента. /В сб. трудов 10-й научно-технической конференции "Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов" – С-Пб.: СПбГАХиПТ, 2004.С.66-70

4. Лебедева Н.В. Модифицирование сталей для прессового инструмента с регулируемым аустенитным превращением. /В сб. трудов конференции молодых ученых и специалистов ЦНИИ КМ "Прометей». – СПб., 2005. С.12-18.

5. Лебедева Н.В., Солнцев Ю.П., Зворыгин Р.Г. Повышение эксплуатационной стойкости штамповых азотсодержащих сталей с регулируемым аустенитным превращением. /Материалы международной конференции "Актуальные проблемы прочности" – Витебск, Беларусь, 2004.Ч1.С.146-152.

6. Лебедева Н.В., Солнцев Ю.П. Пути упрочнения штамповых сталей с регулируемым аустенитным превращением. /В сб. трудов 6-ой международной научно-технической конференции "Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике" – СПб., 2004. С.273-274.