

**СТРУКТУРНЫЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭФФЕКТЫ  
СОВМЕЩЕННОЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ**

**\*к.т.н. Я.И. Спектор, \*к.т.н. Ю.В. Артамонов, \* И.Н. Куницкая,**

**\*\*д.т.н., проф. В.Е. Ольшанецкий, к.т.н. \*\*\* А.Н. Тумко**

*\* ГП “Украинский научно-исследовательский институт  
специальных сталей, сплавов и ферросплавов”*

*\*\* Запорожский национальный технический университет*

*\*\*\* ОАО “Электрометаллургический завод “Днепропецсталь”*

Особенность производства проката специальных машиностроительных сталей (подшипниковых, легированных конструкционных, коррозионностойких, инструментальных, жаропрочных и др.) – большой объем и разнообразие термообработки – отжиг (в т.ч. сфероидизирующий), закалка, термоулучшение, нормализация, гомогенизация. Ее цель – обеспечение высоких требований к микроструктуре, ответственной за комплекс свойств, надежность и долговечность эксплуатации деталей машин и конструкций в стратегических отраслях промышленности – авиастроении, энергетике (в т.ч. атомной), транспорте, нефтехимической, оборонной и др. Перспективным направлением в производстве специальных сталей является совмещение в потоке сортовых станов горячей деформации и термообработки. При такой деформационно-термической обработке реализуются, во-первых, условия формирования регламентированной структуры металла. В результате улучшаются механические свойства сталей – пластичность, прочность, вязкость разрушения и др. Во-вторых, достигаются энергосберегающие эффекты за счет использования тепла прокатного нагрева взамен отдельного нагрева (например, под нормализацию, термоулучшение конструкционных сталей) в термических, калибровочных цехах и на термических участках передельных прокатных и кузнечных цехов. Энергосбережение обеспечивается также за счет сокращения длительности сфероидизирующего и гомогенизирующего отжигов, прежде всего подшипниковых и инструментальных сталей.

В работах ГП “УкрНИИспецсталь”, выполненных в условиях сортовых прокатных станов заводов-производителей спецсталей, а также на лабораторном прокатном стане института ДУО-250, изучены структурные и прочностные эффекты при моделировании сквозной технологии совмещенной деформационно-термической обработки различных спецсталей. Структурные эффекты связаны с особым состоянием горячедеформированного аустенита и его влиянием на кинетику фазовых и структурных превращений при прокатке и последующем охлаждении [1, 2]. Наибольшее улучшение микроструктуры обеспечивается при т. н. регулируемой (по температуре, степени и скорости)

---

горячей деформации, а также регулируемом ускоренном или замедленном охлаждении после деформации в сочетании с оптимальными режимами последующей термообработки.

При анализе структурных эффектов, достигаемых совмещенной деформационно-термической обработкой, специальных сталей выявлена особая роль режимов нагрева под деформацию. В работах [3, 4] по исследованию путей повышения вязкости разрушения стали 40ХН2МА установлена термическая дестабилизация мелкодисперсных и пленочных фаз и положительная роль перераспределения вредных примесей (фосфора, серы) с очищением границ зерен в ходе высокотемпературной аустенитизации при нагреве под горячую прокатку до 1100 – 1200 °С. Использование такого эффекта при нагреве под совмещенную деформационно-термическую обработку позволило существенно повысить трещиностойкость конструкционных сталей.

Основой для выбора деформационных и термических режимов с целью реализации структурных эффектов должны быть соответствующие кинетические диаграммы структурообразования и фазовых превращений при горячей деформации и охлаждении.

В работах УкрНИИспецстали [5, 6] построены диаграммы кинетики рекристаллизации горячедеформированного аустенита для основных 12 марок четырех групп специальных сталей и сплавов – конструкционных, коррозионностойких, подшипниковых, жаропрочных. Установлено, что кинетика рекристаллизации сталей различается на несколько порядков и зависит от характера легирования. Нами показано, что торможение рекристаллизации определяется влиянием выделений дисперсных карбидных и интерметаллидных фаз [1]. Также в очаге деформации возможно формирование ультрамелких зерен [7, 8]. Основным механизмом их образования является динамическая рекристаллизация в местах выхода пакетов скольжения на высокоугловые границы раздела исходных зерен, а также границы вторых фаз [9]. Эти диаграммы являются основой для разработки режимов горячей деформации с целью измельчения зерна, получения оптимальной дислокационной структуры аустенита, а также оптимальной структуры продуктов его превращения, морфологии и размера карбидов при ускоренном охлаждении и последующей термообработке (например, подшипниковых сталей).

Диаграммы рекристаллизации аустенита использованы, в первую очередь, для аустенитных коррозионностой стали и жаропрочного сплава. При горячем многопроходном кручении стали 10Х17Н13М2Т на пластомере «Ирсид» с регулированием степени деформации и длительности междеформационных пауз получено динамически рекристаллизованное ультрамелкое зерно размером 0,8 – 2 мкм. Для жаропрочного сплава ЭИ 437Б-ВД (ХН77ТЮР) разработаны оптимальные температурные условия прокатки и регулируемого охлаждения прутков диаметром 20 – 40 мм в условиях стана 325 завода «Днепрспецсталь». Это позволяет сохранить однородное рекристаллизован-

---

ное зерно, снизить разнотернистость и полосчатость макроструктуры по сечению проката, повысить предел прочности на 24 % (от 760 до 960 МПа), относительное удлинение и сужение на 65 – 70 %, длительную жаропрочность на 24 %.

В соответствии с Отраслевой Программой развития ГМК Украины ГП “УкрНИИспецсталь” разработана ресурсосберегающая технология регулируемой пластической деформации, совмещенной с термической обработкой проката для получения повышенных физико-механических свойств спецсталей [10].

Так, для стали 42ХМ в условиях лабораторного стана ДУО-250 разработана технология термоулучшения с использованием пониженных температур нагрева под прокатку и конца деформации, а также подстуживания с изотермической выдержкой в печи перед нагревом металла под закалку. Получена микроструктура однородного мелкодисперсного сорбита, достигнуто повышение прочности на 15% (от 808 МПа до 851-912 МПа), пластичности на 22%, ударной вязкости на 10-15% (от 937,5-1012,5 кДж/м<sup>2</sup> до 1337,5-1400 кДж/м).

Для высокоуглеродистых подшипниковых сталей ШХ15, ШХ15СГ-В в ходе регулируемой прокатки происходит измельчение карбидов, уменьшение карбидной сетки и величины аустенитного зерна. Установлено, что предварительная гомогенизация заготовки, низкотемпературная прокатка способствуют формированию микроструктуры сфероидизированного перлита даже в процессе охлаждения металла после деформации. За счет этого наблюдается ускорение процесса сфероидизации перлита при последующем отжиге, совмещенном с прокаткой, уменьшается его длительность, улучшается микроструктура стали. Эти эффекты хорошо иллюстрируются построенной в работе [5] совмещенной диаграммой рекристаллизации горячедеформированного аустенита и его превращения при охлаждении.

Для коррозионностойких сталей с закалкой с прокатного нагрева оптимальным решением является подогрев металла после деформации до температур закалки. При этом соблюдаются требования современных стандартов к температуре нагрева под закалку и, таким образом, создание необходимой структуры высокотемпературного аустенита.

В результате этой работы определен состав оборудования и технологические схемы, план размещения оборудования для производства легированных конструкционных, подшипниковых (в т. ч. теплостойких для авиации), коррозионностойких сталей. При этом учтены требования передовых иностранных стандартов по температуре нагрева под закалку, длительности аустенитизации и др. Разработаны технологические задания (с сортаментом и рекомендациями по технологии и оборудованию) на проектирование дооснащения и реконструкцию прокатно-термического производства специальных сталей, которые согласованы с ГП “ГИПРОПРОМ” и ОАО “Днепроспецсталь”.

---

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности разупрочнения и структура горячедеформированного аустенита при прокатке / Я.И. Спектор, Н.В. Тихий, Ю.В. Яценко, А.М. Прокопенко // ФММ. – 1978. – Т. 45. Вып. 1. – С. 176-183.
2. Влияние состояния аустенита на кинетику перлитного превращения и морфологию перлита / Ю.В. Яценко, Я.И. Спектор // Известия АН СССР. Металлы. – 1986. – № 2. – С. 106.
3. Влияние параметров термической и термомеханической обработки на вязкость разрушения стали 40ХН2МА / М.Л. Бернштейн, Я.И. Спектор, В.Н. Дегтярев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 9. – С. 170-171.
4. Влияние температуры аустенитизации и горячей деформации на структуру и механические свойства стали 40ХН2МА / М.Л. Бернштейн, Я.И. Спектор, В.Н. Дегтярев // Физика металлов и металловедение. – 1982. – Т. 53. – № 1. – С. 68-75.
5. Ускорение отжига подшипниковой стали / М. И. Синельников, Е. А. Титаренко // Повышение качества и улучшение сортамента подшипниковых сталей в странах-членах СЭВ. – 1979. – Ч. II. – С. 48-52.
6. Термокинетические диаграммы рекристаллизации аустенита при горячей прокатке специальных сталей / Я.И. Спектор, И.Н. Куницкая, Р.В. Яценко, А.Н. Тумко // МиТОМ. – 2008. – № 7. – С. 6-9.
7. О роли динамической рекристаллизации в формировании ультрамелкозернистой структуры аустенита при многопроходной горячей прокатке специальных сталей / Я. И. Спектор, И. Н. Куницкая // HighMatTech: междунар. конф., 15-19 окт. 2007 г.: тезисы докл. — К., 2007. — С. 84.
8. Особенности формирования сверхмелкозернистой структуры при горячей интенсивной пластической деформации порошковых инструментальных сталей / Я. И. Спектор, И. Н. Куницкая // Прочность неоднородных структур: IV-я Евразийская научно-практич. конф., 8-10 апр. 2008 г.: тезисы докл. – М., 2008. – С. 23.
9. Динамическая рекристаллизация специальных сталей при многопроходной горячей деформации / И. Н. Куницкая, Я. И. Спектор, В. Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 2. – С. 14-18.
10. Отчет по НИОТР «Розроблення ресурсозберігаючої технології регульованої пластичної деформації, суміщеної з термічною обробкою прокату для отримання підвищених фізико-механічних властивостей спецсталей». Приоритетное направление „Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромислому комплексі”. Постановление Кабинета Министров Украины от 17. 04. 2008 г. № 443.