

УДК 669.24:620.183

И. Н. Куницкая¹, канд. техн. наук Я. И. Спектор¹, д-р техн. наук В. Е. Ольшанецкий²¹Украинский научно-исследовательский институт специальных сталей, сплавов и ферросплавов
«УкрНИИ Спецсталь», ²Национальный технический университет;
г. Запорожье

ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Рассмотрены особенности динамической рекристаллизации специальных сталей в процессе многопроходной горячей деформации. Показано, что за счет выхода пакетов скольжения на границы зерен, увеличения скорости их образования происходит локальное формирование ультрамелких рекристаллизованных зерен с высокоугловой разориентировкой границ.

Ключевые слова: динамическая рекристаллизация, ультрамелкое зерно, многопроходная прокатка, специальные стали.

Введение

Кинетика рекристаллизации и структурообразования при горячей деформации рассмотрена многими исследователями [1–3]. В условиях использования лабораторных станов испытаниями на кручение и сжатие показано, что процессом, наиболее значительно влияющим на структурные изменения при многопроходной прокатке, является динамическая рекристаллизация.

Реализация динамической рекристаллизации важна как для процесса разупрочнения и повышения технологичности горячего передела, так и для измельчения зерна непосредственно при деформации.

Для возможности управления структурой при горячей деформации для различных сталей специального назначения построены диаграммы рекристаллизации [4]. Кинетика рекристаллизации, представленная на этих диаграммах, отражает влияние различных факторов (структуры, режима прокатки и др.) на ход протекания этого процесса. Прежде всего это касается выделений промежуточных дисперсных фаз, количества и процентного содержания основных фаз, а также ликвационных распределений указанных фаз в микроструктуре сталей. При горячей деформации степень ликвации уменьшается за счет многократных высокотемпературных (в том числе специальных гомогенизирующих) нагревов, и действия самой деформации. В результате улучшается однородность структуры с уменьшением количества δ -феррита; снижается балл карбидной неоднородности и размер карбидов, достигается равномерное распределение и округлая форма частиц карбидной и интерметаллидной фазы. Тем не менее сохранение некоторой частичной структурной неоднородности по ферритной фазе, распределению и морфологии дисперсных карбидов, интерметаллидов (σ - и χ - фаз) в аустените может влиять на кинетику рекристаллизационных процессов.

Особенностью диаграмм кинетики рекристаллизации, построенных в определенных температурных интервалах, является то, что они отражают высокую скорость динамической рекристаллизации в очаге деформации. Выполненные расчеты показали, что эффективная энергия активации динамической рекристаллизации существенно меньше в сравнении с рекристаллизацией во время междеформационной паузы [5]. На наш взгляд, ускоренная кинетика динамической рекристаллизации связана с образованием зародышей рекристаллизации за счет механизма локального появления зубчатости исходных границ при выходе на них так называемых пакетов скольжения, а также образования новых динамически рекристаллизованных зерен вдали от исходных границ.

Подобный локальный механизм характерен также и для формирования нанокристаллических зерен при интенсивной пластической деформации сдвигом [6]. Однако использование интенсивной пластической деформации ограничивается отсутствием промышленных технологий и вследствие этого – небольшим сортаментом конечной продукции. При этом в процессе горячей деформации локальный механизм формирования зародышей имеет свои особенности.

Цель работы – на примере модельной и промышленной многопроходной горячей прокатки спецсталей, используя термокинетические диаграммы рекристаллизации и расчеты эффективной энергии активации динамической рекристаллизации, представления о локальном формировании зародышей, показать особенности динамической рекристаллизации и формирования ультрамелкого зерна.

Методика проведения исследований

Рассмотрение кинетики и механизма рекристаллизации горячедеформированного аустенита выполнено на лабораторном стане ДУО-250 одно- и двухпроход-

ной прокаткой заготовок коррозионностойкой стали 10X17H13M2T в интервале температур 1000–1150 °C со степенью обжатия 15–25 % за один проход и междеформационными паузами 10–1000 с. Под прокатку использовали заготовки полосового сечения с размером 19,5×22×50 мм, полученные из сортового прутка диаметром 22 мм после его порезки и обжатия на лабораторном стане. Подготовка микроструктуры под прокатку выполнена отдельным нагревом до 1200 °C с выдержкой 8 часов и последующим охлаждением в воде для получения крупного зерна (150–180 мкм), что характерно для высокотемпературных нагревов передельных заготовок, а также для достоверного разделения рекристаллизованных и нерекристаллизованных зерен. С помощью электронной и световой микроскопии выполнена идентификация и определен характер распределения дисперсных карбидных и интерметаллидных фаз, образующихся в ликвационных зонах (в различных температурных интервалах) и сопровождающих рекристаллизационные процессы.

Представления о динамической рекристаллизации в стали с различной степенью структурной неоднородности (например, при переделе литого металла и деформированной заготовки) получены при исследовании сортовых кованных (диаметром 200–250 мм) и катаных (диаметром 150–190 мм и 22 мм) прутков сталей 10X17H13M2T и 10X18H10T в состоянии после прокатки с охлаждением на воздухе или после закалки в воду. Влияние неоднородности микроструктуры в передельном металле на кинетику и особенности структуры рекристаллизации изучены после высокотемпературного кручения образцов из кованой (диаметром 220 мм) и катаной (диаметром 180 мм и 22 мм) стали 10X17H13M2T.

Представления о динамической рекристаллизации в микроструктуре с различной степенью неоднородности (например при переделе литого металла и деформированной заготовки) получены исследованием сортовых кованных (диаметром 200–250 мм) и катаных (диаметром 150–190 мм и 22 мм) прутков сталей 10X17H13M2T и 10X18H10T в состоянии после прокатки с охлаждением на воздухе или после закалки в воду. Влияние неоднородности микроструктуры в передельном металле на кинетику и особенности структуры рекристаллизации изучены после высокотемпературного кручения образцов из кованой (диаметром 220 мм) и катаной (диаметром 180 мм и 22 мм) стали 10X17H13M2T.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены микроструктуры горячедеформированных прокаткой при 1100 °C и 1150 °C образцов стали 10X17H13M2T с исходным крупным зерном диаметром 100–200 мкм. Видно, что по телу крупного зерна и на его границах уже в очаге деформации образуются динамически рекристаллизованные мелкие зерна размером 1–13 мкм. Неоднородность обра-

зования зерен связана с несколькими структурными факторами: границами зерен, неоднородностью расположения «следов» пластической деформации – линий сдвига (рис. 1, б), двойников (рис. 1, в), ликвационной строчечностью (полосчатостью) карбидных, нитридных и карбонитридных фаз (рис. 1, а). В этих зонах особенно проявляется неоднородность сдвигообразования и, соответственно, распределения плотности дислокаций. В указанных местах происходит выход «пакетного скольжения», характерного для горячей деформации, на уже частично сформированные высокоугловые границы – границы вторых фаз или высокоугловые границы между исходными зернами (рис. 1, а), а также торможение скольжения «пакетов» на неоднородностях пластической деформации. Энергетическая подготовленность таких зон, с одной стороны, за счет наличия готовой высокоугловой границы, с другой стороны, за счет сохранения в самом пакете минимальной (близкой к исходной, до деформации) плотности дислокаций способствует формированию в таких зонах первых зародышей рекристаллизации. Иными словами, возникает «зародышевая зона» с минимальной эффективной энергией активации для превращения ее в зародыш рекристаллизации. Эти представления согласуются с показанной существенно меньшей энергией активации процесса динамической рекристаллизации по сравнению с рекристаллизацией при последеформационной выдержке [5].

Выполненные металлографические исследования и анализ кинетики динамической рекристаллизации в целом показали следующие морфологические особенности структуры, связанные с динамической рекристаллизацией при горячей прокатке стали 10X17H13M2T:

- зубчатость границ исходных деформированных зерен (размер зубцов 0,5–6 мкм);
- наличие рекристаллизованных зерен внутри исходных деформированных зерен.

При этом в микроструктуре с зубчатостью границ зерен выявлены цепочки динамически рекристаллизованных зерен, расположенных преимущественно в приграничных участках, или отдельные зерна, сформировавшиеся непосредственно на зубцах.

Увеличение количества рекристаллизованных зерен в направлении к границам зерен наблюдается одновременно с незначительным процентом динамически рекристаллизованных зерен в центральных участках исходного зерна. Если динамическая рекристаллизация начинается с внутренних объемов исходного зерна, то развитие зубчатости может быть несущественным на фоне значительного процента рекристаллизованной структуры и исчезновения границ старых зерен.

Особенностью такой динамической рекристаллизации, инициированной деформацией, является одновременное формирование зародышей рекристаллизации,

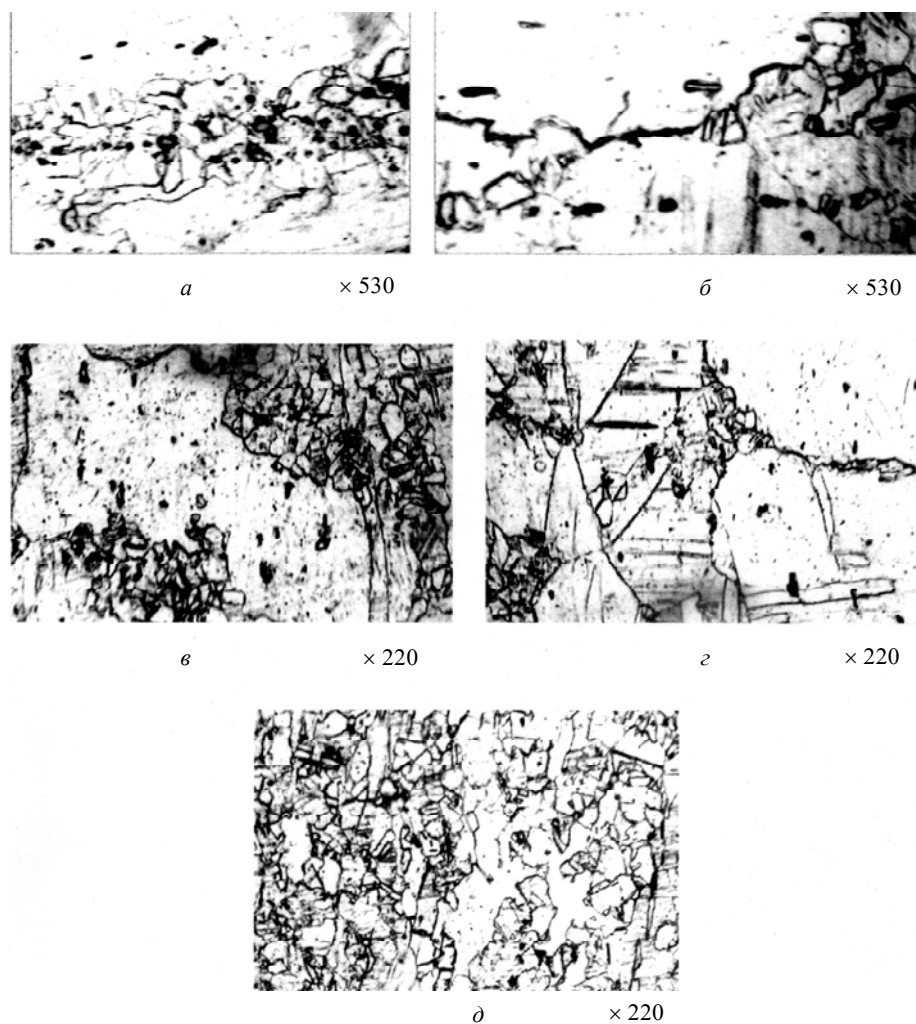


Рис. 1. Микроструктура динамічної (в очаге деформації) рекристалізації сталі 10X17H13M2T після однопрохідної прокатки при 1100 °C (а, б) і 1150 °C (в, г, д) без післядеформаційної видержки

их рост и преобразование в зерна с высокоугловыми границами.

Так, при сравнительно низких температурах прокатки 1000–1100 °C динамическая рекристаллизация идет с образованием зубчатости и небольшого количества новых зерен на границах. Средняя высота зубцов невелика – 0,5–2 мкм, процент рекристаллизации составляет порядка 2–6 %. В этом интервале температур выделяются дисперсные частицы карбидов, которые и замедляют динамическую рекристаллизацию.

С повышением температур прокатки до 1150 °C характер динамической рекристаллизации меняется: на миграцию границ зерен и образование зубчатости накладываются инициированные деформацией процессы динамической рекристаллизации по всему объему исходного зерна. Размер рекристаллизованных зерен составляет 3–13 мкм, средняя высота зубцов увеличивается до 5–6 мкм. При этом степень развития зубчатости снижается, а процент динамической рекристаллизации возрастает до 25–35 % за один проход. Растет также доля динамической рекристаллизации в об-

щем проценте рекристаллизованной структуры, рис. 1.

Улучшение распределения и морфологии вторичных фаз и, как следствие, повышение степени гомогенности твердого раствора показало снижение интенсивности выделения дисперсных карбидных и интерметаллидных фаз при температурах горячей деформации. Тормозящее влияние фаз на процесс рекристаллизации уменьшается, ускоряется кинетика динамической рекристаллизации и образование мелких зерен.

Описанные результаты и представления о динамической рекристаллизации в очаге деформации прокаткой учтены при исследовании влияния ликвационных структурных неоднородностей на горячую пластичность стали, а также для получения ультрамелкозернистых (близких к нанокристаллическим) структур. Опробована многопроходная горячая деформация кручением на торсионном пластомере «Ирсид» в режиме т. н. интенсивной пластической деформации с регулированием скорости, степени, температуры и междеформационных пауз (рис. 2).

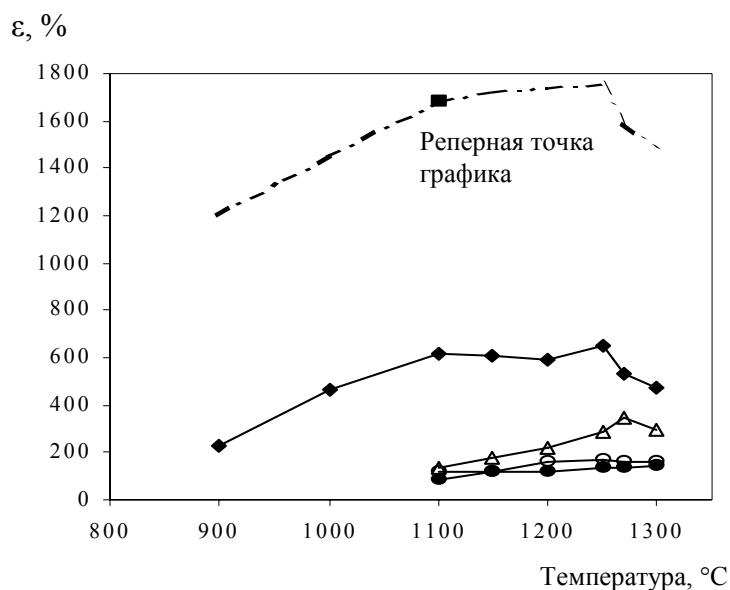


Рис. 2. Высокотемпературная деформация (ϵ) до разрушения в интервале температур горячего передела при кручении стали 10X17H13M2T с различным исходным состоянием:

литой металл – \circ - и \bullet - с предварительной выдержкой при температуре кручения 1 час; литой металл с гомогенизацией по режиму 1250 °C, 5 часов (Δ -); ковкая заготовка диаметром 200–250 мм (\blacklozenge -); прокат диаметром 22 мм (\circ -) – нагрев на 1200 °C, 0,5 часа с подстуживанием до температуры испытания)

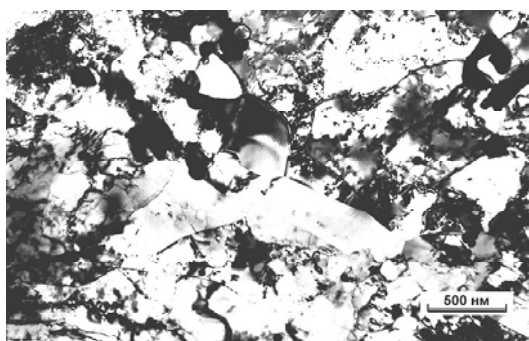


Рис. 3. Ультрамелкое зерно в стали 10X17H13M2T в образце после кручения при 1100 °C. Просвечивающая электронная микроскопия на фольгах (электронный микроскоп фирмы «СЭЛМИ», г. Сумы)

В результате интенсивной горячей пластической деформации кручением металла стали 10X17H13M2T из горячекатаного прутка диаметром 22 мм с рекристаллизованной мелкозернистой структурой во время каждого акта кручения формируется ультрамелкое зерно величиной 0,8–2 мкм, рис. 3, и повышается горячая пластичность (кривая 5 рис. 2).

В ковном металле процессы динамической рекристаллизации и формирования мелкого зерна тормозятся за счет сохранения ликвационных зон с повышенным содержанием ферритной фазы и выделениями дисперсных карбидов. Неоднородность микроструктуры прутковой стали, используемой для кручения,

была минимальной: наблюдается аустенит с тонкими полосами сохранившегося δ - феррита, который растворяется при гомогенизационном нагреве перед деформацией.

При исследовании промышленных плавок сталей 10X17H13M2T и 08X18H10T показаны основные принципы формирования рекристаллизованных микроструктур при горячем переделе. Они согласуются с результатами, полученными при моделировании передела горячей прокаткой и кручением на металле с разным структурным состоянием. Были учтены различия температурно-временных условий в прокатном и ковочном производстве, а также размер профиля при исследовании микроструктуры.

В процессековки длительность междеформационных пауз, а следовательно, и охлаждение металла больше, чем при прокатке. Поэтому используется междеформационный нагрев заготовок. Таким образом, рекристаллизационные процессы начинаются непосредственно в очаге деформации и получают дальнейшее развитие во время последеформационных пауз, а также при междеформационном нагреве. Наоборот, при прокатке рекристаллизация ускоряется за счет динамических процессов, вследствие небольшой паузы между проходами (10–15 с) и незначительного падения температур.

Для исследования рекристаллизации была выбрана зона вырезки образцов под механические испытания на расстоянии 17–20 мм от поверхности заготовок.

На основе предварительных данных по моделированию приняли, что эта зона в процессе деформации не испытывает ускоренного охлаждения и торможения рекристаллизации вследствие перепада температур между нагретой заготовкой, температурой окружающей среды и валков прокатного стана. Считали, что кинетика рекристаллизации здесь определяется выше описанными температурно-временными особенностями процесса деформации с постепенным охлаждением металла.

В ковальной стали сформирована частично рекристаллизованная структура, при этом процент рекристаллизации составляет 25–70 %. Рекристаллизованное зерно довольно крупное в сравнении с полученным при прокатке. Это объясняется недостаточным развитием динамической рекристаллизации в условиях действия снижения температур при многократной и замедленной в сравнении с процессом прокатки деформацией, а также с промежуточными междеформационными нагревами.

При исследовании проката наблюдали мелкозернистую и однородную рекристаллизованную структуру с тонкими вытянутыми выделениями ферритной фазы. Процент рекристаллизованной структуры, в основном за счет динамической рекристаллизации, инициированной деформацией, составляет 80–95 % [7]. Результаты исследований показали, что кинетика динамической рекристаллизации и измельчение зерна определялись температурно-деформационным режимом.

Выводы

1. В условиях горячей многопроходной деформации со степенью 15–25 % за один проход в интервале температур 1000–1150 °С происходит динамическая рекристаллизация.

2. Динамически рекристаллизованные зерна зарождаются в местах выхода «пакетов скольжения» на структурные неоднородности – границы исходных зерен, ликвационные выделения вторых фаз, зоны расположения неоднородного сдвигообразования, характерного для горячей деформации. Наличие частично сформированных высокоугловых границ в указанных местах, а также небольшая плотность дислокаций в теле пакета способствуют последующему формированию рекристаллизованных зерен, в том числе ультрамелких размером 0,8–2 мкм.

рен, ликвационные выделения вторых фаз, зоны расположения неоднородного сдвигообразования, характерного для горячей деформации. Наличие частично сформированных высокоугловых границ в указанных местах, а также небольшая плотность дислокаций в теле пакета способствуют последующему формированию рекристаллизованных зерен, в том числе ультрамелких размером 0,8–2 мкм.

Перечень ссылок

1. Recrystallization of austenitic stainless steels after hot rolling / [D. Taul, G. Gledman] // Metal Science. – 1979. – Vol. 13. – № 3–4. – P. 246–256.
2. Механизм образования зубчатости на границах зерен при горячей пластической деформации / [М. И. Синельников, Я. И. Спектор, К. Н. Мурина, Н. В. Тихий] // Физика металлов и металловедение. – 1973. – Т. 36. – Вып. 2. – С. 420–423.
3. Effect of initial grain size on dynamic recrystallization in high purity austenitic stainless steels / [M. El Wahabi, J. Gavard, F. Montheillet et al.] // Acta Mat. – 2005. – Vol. 53. – Issue 17. – P. 4605–4612. – Режим доступа до журн. : www.actamat-journals.com.
4. Термокинетические диаграммы рекристаллизации аустенита при горячей прокатке специальных сталей / [Я. И. Спектор, И. Н. Куницкая, Р. В. Яценко, А. Н. Тумко] // МнГОМ. – 2008. – № 7. – С. 6–9.
5. Об энергетике структурообразования при горячей деформации прокаткой аустенитной стали / [И. Н. Куницкая, В. Е. Ольшанецкий, Я. И. Спектор и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – № 2. – С. 17–23.
6. Nanostructures by severe plastic deformation of steels: advantages and problems / Dobatkin S.V., Zrnik J., Mamuzic I. // Metalurgija. – 2006. – Vol. 45. – № 4. – P. 313–321.
7. Термокинетические диаграммы и механизмы рекристаллизации при многопроходной горячей деформации специальных сталей / [Я. И. Спектор, И. Н. Куницкая, А. Н. Тумко и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – № 1. – С. 11–17.

Одержано 21.06.2010

I. N. Kunitskaya, Ya. I. Spector, V. E. Ol'shanetskiy

SPECIAL STEELS DYNAMIC RECRYSTALLIZATION IN MULTIPASS HOT DEFORMATION

Розглянуті особливості динамічної рекристалізації спецсталей у процесі багатпрохідної гарячої деформації. Показано, що завдяки виходу пакетів ковзання на межі зерен, збільшення швидкості їх утворення відбувається локальне формування ультрадрібних рекристалізованих зерен з висококутовою дезорієнтацією меж.

Ключові слова: динамічна рекристалізація, ультрадрібне зерно, багатпрохідне прокатування, спеціальні сталі.

The special steels dynamic recrystallization features in multipass hot deformation have been considered. The local formation of ultrafine grains with high-angle boundaries disorientation take place, as a result packages slip exit into grain boundaries and heterogeneity and also energy ability of these zones.

Key words: dynamic recrystallization, ultrafine grain, multipass rolling, special steels.