

УДК [621.78.01:669.14.018.291.3-426]:620.18

Зависимость релаксационной стойкости высокопрочной стабилизированной арматуры от микроструктуры стали после механотермической обработки

А.Г. Корчунов*, Д.К. Долгий

*Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова
Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38*

Received 14.11.2013, received in revised form 27.12.2013, accepted 03.03.2014

Статья посвящена исследованию влияния изменения микроструктуры стали марки 80P и уровня остаточных напряжений на релаксационную стойкость после проведения механотермической обработки. Методика испытаний включала электронно-микроскопическое и рентгеноструктурное виды исследования стали марки 80P, а также проведение испытаний на релаксацию напряжений. В ходе работы установлены зависимости релаксационной стойкости от стабильности структуры материала, полученной после проведения механотермической обработки с различными температурой нагрева и усилием натяжения.

Ключевые слова: высокопрочная арматура, стабилизация, микроструктура, остаточные напряжения, механотермическая обработка, релаксационная стойкость, индукционный нагрев.

Введение

В настоящее время потребитель предъявляет все более высокие требования к свойствам высокопрочной арматуры. Наряду с высокими показателями механических характеристик большое внимание уделяется специальным свойствам, важнейшим из которых является релаксационная стойкость. Релаксационная стойкость характеризуется способностью материала сопротивляться релаксации напряжений. Под релаксацией напряжений понимается процесс самопроизвольного снижения напряжений в материале при сохранении неизменной величины его общей деформации. С течением времени в нагруженном образце упругая составляющая суммарной деформации снижается, а пластическая растет. Высокие значения релаксационной стойкости позволяют избежать трещинообразования в бетоне в условиях длительной работы под воздействием циклических нагрузок. Одним из перспективных направлений достижения высоких показателей механических свойств наряду с высокими значениями релаксационной стойкости является применение в технологии производства высокопрочной арматуры в каче-

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: agkorchunov@mail.ru

стве заключительной операции механотермической обработки (МТО). Процесс МТО представляет собой совмещение двух операций – нагрева и натяжения. Судя по немногочисленным литературным данным, данное натяжение осуществляется с усилиями, позволяющими с незначительной степенью деформировать металл в пластической области. Нагрев осуществляется до температур отпуска (250–420 °С). Как правило, для нагрева используется индукционная печь, позволяющая в поточной линии осуществлять МТО с достаточно высокими скоростями (50–70 м/мин) [1-2].

Процесс МТО также получил название «стабилизация» за счет высокой эффективности снятия остаточных напряжений, накопленных в ходе предварительной деформационной обработки (волочения и профилирования), а также вследствие высокой степени упорядочивания дислокационной структуры, что напрямую оказывает влияние на повышение релаксационной стойкости материала. Эффективность данных изменений существенным образом зависит от установленных параметров процесса – температуры нагрева и усилия натяжения. Таким образом, благодаря управлению параметрами процесса важной задачей является достижение оптимального сочетания свойств высокопрочной арматуры: высоких показателей механических характеристик (временное сопротивление разрыва – не менее 1600 Н/мм², предел текучести – не менее 1450 Н/мм², относительно удлинение – не менее 6 %) и релаксационной стойкости (релаксация напряжений не должна превышать 4 % за 1000 ч). Для решения данной задачи необходимо представлять, в какой степени структурные изменения материала, происходящие под воздействием МТО, оказывают влияние на динамику изменения релаксационной стойкости. В этой связи цель проводимой научной работы – исследование влияния величины параметров процесса МТО на изменение структуры стали и величину внутренних напряжений и, как следствие, на изменение релаксационной стойкости материала.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования служила высокоуглеродистая сталь марки 80P, используемая для производства высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». Образцы были изготовлены с применением следующих параметров процесса МТО: температура нагрева находилась в диапазоне от 320 до 400 °С, усилие натяжения в пределах от 19 600 до 58 800 Н, скорость обработки 50 м/мин. Предварительная обработка включала патентирование и волочение с суммарной степенью деформации 58 %. Для определения уровня остаточных напряжений и изменения структуры стали марки 80P под влиянием МТО были проведены рентгеноструктурное и электронно-микроскопическое исследования. По результатам рентгеноструктурного анализа получены данные о положении центра тяжести линии 200 феррита, характеризующие величину остаточных макронапряжений в образцах высокопрочной арматуры, и ширине дифракционного максимума, отражающей уровень микроискажений кристаллической решетки феррита.

Для определения релаксационной стойкости образцов высокопрочной арматуры из стали марки 80P проводили испытания на релаксацию напряжению в течение 120 и 1000 ч и начальной нагрузке 70 % от временного сопротивления разрыву [3]. Испытания на релаксацию напряжений осуществляли по методике ГОСТ 28334 «Проволока и канаты стальные для ар-

мирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Метод испытания на релаксацию при постоянной деформации».

Результаты электронно-микроскопического и рентгеноструктурного исследований

Величины остаточных напряжений $\sigma_{\perp}$ в образцах высокопрочной арматуры, рассчитанных по смещению центра тяжести линии (200) феррита, приведены в табл. 1. Из данных таблицы видно, что уровень остаточных напряжений во всех образцах ниже, чем в исходном образце с предварительной обработкой патентированием и волочением, не подвергнутом МТО, для которого $\sigma_{\perp} = 1540$ Н/мм². Это свидетельствует о том, что МТО в целом способствует релаксации напряжений, возникших в процессе волочения проволоки.

Как видно из табл. 1, значения величины $\sigma_{\perp}$ в исследуемых образцах меняются от + 760 до – 250 Н/мм². Таким образом, эффективность МТО с различными значениями параметров процесса неодинакова.

Развитию процесса снижения остаточных напряжений способствуют как повышение температуры, так и увеличение натяжения. Оптимальной температурой нагрева является температура не ниже 360 °С. Интервал рекомендуемых усилий находится в пределах между 34 300 и 46 600 Н. Усилие 19 600 Н недостаточно для эффективного снятия напряжений, величина $\sigma_{\perp} = 760$ Н/мм². Усилие 58 800 Н чрезмерно и создает дополнительную упругую деформацию, значение $\sigma_{\perp} > 0$.

Процесс снижения остаточных напряжений осуществляется за счет снятия напряжений в локальных частях и объемах изделия. Поэтому в значительной степени о снятии макронапряжений в масштабе изделия можно судить по изменению ширины рентгеновских линий, которая определяется уровнем микроискажений.

Изменения ширины линии 200 феррита представлены в табл. 2.

Таблица 1. Величина остаточных макронапряжений в образцах высокопрочной арматуры после МТО с различными значениями параметров управления процессом, $\sigma_{\perp}$, Н/мм²

Температура, °С	Установленная тяга, Н			
	19600	34300	46600	58800
320	-	-	510	-
360	760	510	510	-250
400	760	-	0	-250

Таблица 2. Ширина линии феррита B_{200} в стали марки 80Р, град. после МТО с различными значениями параметров управления процессом

Температура, °С	Установленная тяга, Н			
	19600	34300	46600	58800
320	-	-	0,332	-
360	0,279	0,279	0,288	0,330
400	0,271	-	0,283	0,355

После волочения ширина линии максимальна и составляет $B_{200} = 0,337$ град. МТО способствует снижению уровня внутренних микроискажений. Основным фактором воздействия является температура. При повышении температуры с 320 до 400 °С (при усилии натяжения 46 600 Н) о снижении уровня микронапряжений свидетельствует изменение ширины линии с 0,332 до 0,283 град. Увеличение натяжения, напротив, способствует повышению уровня микроискажений и, как следствие, уширению линии. Значение B_{200} возрастает с 0,279 град. до исходного (после волочения) состояния – до 0,330 град. при изменении усилия натяжения с 19 600 до 58 800 Н (при температуре нагрева 360 °С).

Результаты электронно-микроскопического исследования отображают тот факт, что существенных изменений в структуре образцов после МТО с усилием натяжения 19 600 Н при температурах 360 и 400 °С по сравнению с исходным (деформированным) состоянием не происходит (рис. 1). В ферритных ламелях происходило частичное перераспределение дислокаций. В карбидной фазе развивалась фрагментация, при 400 °С наблюдались начальные стадии коагуляции осколков цементитных пластин. В процессе механотермической обработки с усилием натяжения 34 300 Н в структуре развивались аналогичные процессы.

Исследования образцов после МТО с усилием натяжения 46 600 Н и температурах нагрева 320, 360 400 °С (рис. 2) показали, что основные структурные изменения наблюдались в ферритной составляющей перлита. По мере повышения температуры нагрева в ферритных ламелях последовательно развивались следующие процессы: преимущественное перераспределение одиночных дислокаций (320 °С), взаимодействие и перемещение групп дислокаций (360 °С), начальные этапы формирования дислокационных стенок в отдельных ферритных ламелях (400 °С). Процесс фрагментации карбидной фазы, характерный для температуры МТО 320 °С, при температурах 360 и 400 °С наблюдается совместно с начальными стадиями коагуляции пластинчатого цементита.

Аналогичные исследования проводили на образцах после МТО с усилием натяжения 58 800 Н и температурах 360, 400 °С (рис. 3). Отличительная особенность МТО с данными значениями параметров управления процессом заключается в активизации процессов дефор-



Рис. 1. Структура стали марки 80Р после МТО 360 °С/19 600 Н (светлопольное изображение, увеличение 37 000)

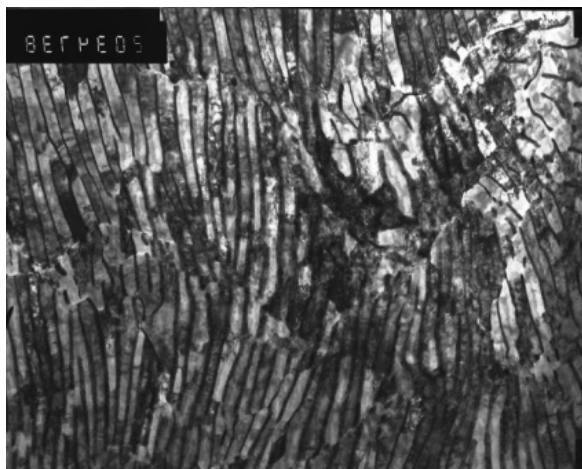


Рис. 2. Структура стали марки 80Р после МТО 360 °С/46 600 Н (светлопольное изображение, увеличение 20 000)

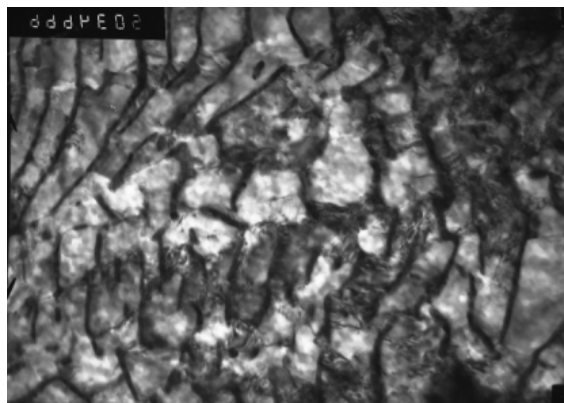


Рис. 3. Структура стали марки 80Р с УМЗ после МТО 400 °С/58 800 Н (светлопольное изображение, увеличение 50 000)

мационного старения феррита, направленном перемещении атомов углерода к дислокациям с образованием дисперсных карбидов. Процессы эволюции дислокационной субструктуры в ферритных ламелях аналогичны описанным для образцов с усилием натяжения 46 600 Н. Отличие заключается в том, что при 400 °С процесс перемещения и взаимодействия развивается активнее и приводит к образованию ячеистой субструктуры и появлению областей, свободных от дислокаций.

Таким образом, в ходе проведенных исследований было изучено влияние температуры нагрева и усилия натяжения МТО на изменение структуры стали марки 80Р, величины макро- и микронапряжений. Установлено, что в результате МТО высокопрочной арматуры в стали марки 80Р обеспечивается перераспределение дислокаций, снижение их плотности и выстраивание в стенки ячеек. Такое формирование ячеистой дислокационной субструктуры приводит к появлению областей, свободных от дислокаций. Происходит существенное снижение уровня

макро- и микронапряжений в материале с различной эффективностью в зависимости от различных значений показателей управления процессом.

Для сопоставления результатов электронно-микроскопического и рентгеноструктурного исследований образцов высокопрочной арматуры после МТО со значениями релаксационной стойкости образцов после МТО с применением различных значений параметров процесса были проведены испытания на релаксацию напряжений.

Результаты испытаний на релаксацию напряжений

Для проведения испытаний на релаксацию напряжений были отобраны образцы высокопрочной арматуры из стали марки 80Р после МТО со следующими значениями параметров процесса: температура нагрева находилась в пределах от 320 до 380 °С, усилие натяжения в пределах от 19 600 до 58 800 Н. Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 4.

По результатам проведенных испытаний можно судить о влиянии параметров процесса МТО на релаксационную стойкость материала. Таким образом, данные испытаний хорошо коррелируются с результатами электронно-микроскопического и рентгеноструктурного исследований. Образцы высокопрочной арматуры после МТО с применением температуры нагрева (320 °С) и усилием натяжения (19 600, 34 300 Н) из диапазона, расположенного ниже рекомендуемого по результатам электронно-микроскопического и рентгеноструктурного исследований, имеют неудовлетворительные показатели релаксационной стойкости (релаксация напряжений превышает 4 %). Образцы высокопрочной арматуры после МТО с температурой нагрева 360 и 380 °С и усилием натяжения в диапазоне от 44 100 до 58 800 Н полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям по релаксационной стойкости.

Заключение

В ходе проведенных исследований было установлено, что процесс совмещения операций нагрева и натяжения (МТО) является эффективным способом стабилизации структуры стали путем упорядочивания дислокаций и снятия внутренних напряжений в сталях, накопившихся

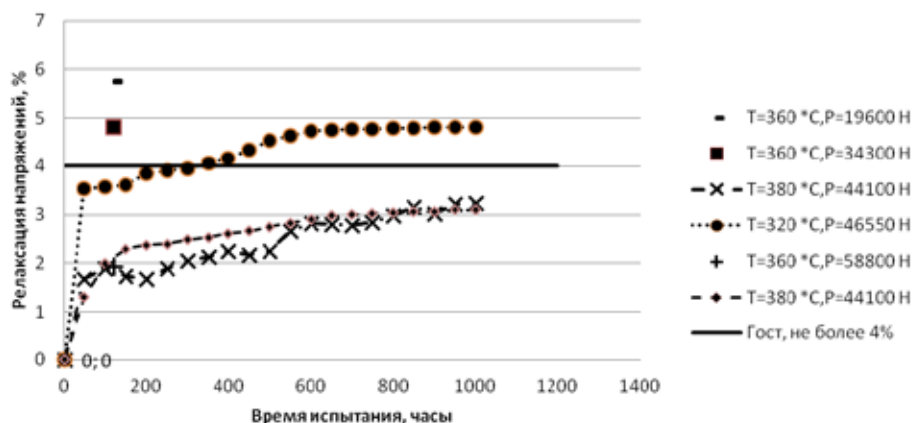


Рис. 4. Релаксация напряжений высокопрочной арматуры из стали марки 80Р после МТО с различными значениями параметров процесса

в результате предварительной деформационной обработки. Однако эффективность применения МТО неоднозначна. Она зависит от установленных параметров процесса – температуры нагрева и усилия натяжения. Установлено, что оптимальные значения температуры МТО находятся выше 360 °С, а усилия натяжения располагаются в пределах от 34 300 и до 46 600 Н. Данные по структурным изменениям стали марки 80Р хорошо коррелируются с результатами испытаний на релаксацию напряжений. Образцы высокопрочной арматуры, подвергнутые МТО со значениями параметров процесса, находящихся в рекомендуемых диапазонах, обладают наибольшими значениями релаксационной стойкости. Можно сделать вывод о том, что релаксационная стойкость материала напрямую зависит от стабильности структуры и чем она выше, тем в меньшей степени будут релаксировать напряжения под воздействием нагрузки.

Работа проведена в рамках реализации Программы стратегического развития университета на 2012 – 2016 гг. (конкурсная поддержка Минобробразования РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО), а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0068 «Разработка фундаментальных принципов проектирования многостадийных процессов термомеханического наноструктурирования стальных заготовок большого диаметра».

Список литературы

- [1] Барышников М.П., Долгий Д.К., Куранов Ю.К., Зайцева М.В. Исследование процесса механотермической обработки арматуры из высокоуглеродистых сталей // Сталь. 2012. № 2. С. 89-92.
- [2] Долгий Д.К., Корчунов А.Г., Барышников М.П. Моделирование процесса стабилизации высокопрочной холоднодеформированной арматуры // Вестник МГТУ им Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 43-45.
- [3] Корчунов А.Г., Долгий Д.К. Исследование влияния механотермической обработки на релаксационную стойкость высокопрочной арматуры. Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. под ред. проф. М.В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2012. Вып. 38. С. 107-112.
- [4] Корчунов А.Г., Долгий Д.К., Яковлева И.Л. Исследование влияния механотермической обработки холоднодеформированной арматурной стали ответственного назначения на уровень остаточных напряжений // Новые материалы и технологии – НМТ-2012: материалы Всероссийской научно-технической конференции. М.: МАТИ, 2012. С. 11-12.

The Dependence of the Relaxation Resistance of High-Strength Stabilized Armature from Microstructure of Steel after Thermomechanical Processing

Aleksei G. Korchunov and Dmitriy K. Dolgiy

Magnitogorsk State Technical University

named after G.I. Nosov

38 Lenin, Magnitogorsk, 455000, Russia

The article investigates the impact of changes in the microstructure of steel 80R and the level of residual stress on relaxation resistance after thermomechanical processing. The test procedure consisted of electron microscopic and X-ray studies of steel 80R, as well as the testing of the stress relaxation. During the work obtained dependences of the relaxation resistance of the structural stability of the material obtained after thermomechanical processing with different heating temperature and tension force.

Keywords: high-strength armature, stabilization, microstructure, residual stresses, thermomechanical processing, relaxation resistance, induction heating.
