

УДК 621. 779

О. И. Шаврин, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет
В. Б. Дементьев, доктор технических наук, профессор, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск
Н. А. Спичкин, кандидат технических наук, доцент, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

О МЕЗОУРОВНЕВОМ ПОДХОДЕ К ФОРМИРОВАНИЮ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ

Предлагается описание условий формирования структуры, свойств и качества изделий из конструкционных сталей при термомеханическом упрочнении с позиций мезоуровневого масштабирования процессов, что позволит системно подойти к разработке технологий упрочняющей обработки ответственных тяжело нагруженных деталей.

Ключевые слова: мезоуровневый подход, термомеханическое упрочнение.

В настоящее время одним из эффективных способов повышения комплекса механических свойств и конструктивно-технических характеристик ответственных деталей машин из среднелегированных конструкционных сталей типа 30ХН2МФА, 38ХН3МФА, 30ХГСН2А, 38ХС и др. является термомеханическая обработка и ее высоко-температурная схема – ВТМО. Представляя собой объединенные в один технологический цикл и проводимые непрерывно-последовательно нагрев, деформацию, охлаждение и последующий отпуск, который может проводиться как в цикле, так и отдельно, ВТМО является сложной технологической системой с большим числом контролируемых параметров и ретикулярно-иерархическими связями между ними, что в конечном итоге определяет показатели качества обрабатываемых изделий. Поэтому построение маршрута обработки, назначение технологических режимов и регламента использования специализированного технологического оборудования, инструмента и оснастки, обеспечивающих повышенный комплекс свойств изделия с минимальными затратами времени и ресурсов, является достаточно сложной технической задачей. В связи с этим представляется целесообразным при разработке данной технологии определенным образом систематизировать уровни, на которых протекают процессы структурообразования в металле, с целью выбора приоритетов и построения оптимальной технологии. Кроме того, целесообразно остановиться на рассмотрении определенной номенклатуры изделий для выработки такого подхода к описанию явлений в процессе ВТМО. В данном случае речь идет об осесимметричных тяжело нагруженных сплошных и полых деталях машин (валы, оси, пальцы, штоки, стволы спортивно-охотничьего оружия и т. п.), доля которых в общей номенклатуре изделий машиностроения составляет более 20 %. Для повышения качества таких деталей предложена технология ВТМО с деформацией исходной горячекатаной заготовки винтовым обжатием (ВО) в неприводной трехроликовой клетки [1–3].

Накоплен достаточно обширный эмпирический материал, установлен ряд качественных и количественных взаимосвязей между режимами ВТМО ВО и показателями качества обрабатываемых изделий, но для получения полной картины происходящих явлений необходимо их определенным образом систематизировать и масштабировать.

Идея масштабной-структурной иерархии при обработке материалов была сформулирована и развита научной школой академика В. Е. Панина [4–7]. В этих работах была предложена классификация масштабных уровней в материале и мультиуровневая иерархия процессов деформации металлических материалов, включающая пять уровней деформации:

- 1) механический уровень (упругий материал);
- 2) уровень дефектов трансляционного типа (локальные структурные изменения, дефекты трансляционного типа – дислокации);
- 3) уровень дефектов ротационного типа (разориентированные дефектные структуры);
- 4) уровень локального нарушения сплошности (образование микропор и микротрещин);
- 5) уровень глобального нарушения сплошности (формирование магистральных трещин, разрушение металла).

Эти уровни полностью описывают процесс деформации твердого тела от упругости до разрушения макрообъема, но технологические процессы пластического деформирования соответствуют уровням 2–4 и могут быть интерпретированы как мезоуровни.

Масштабные уровни протекания процессов при деформировании материала, а в более широком смысле при термомеханических воздействиях, приведены в табл. 1.

Рассмотрим, каким образом процессы, происходящие при ВТМО ВО, могут быть интерпретированы с этих позиций.

Прежде всего ВТМО ВО – процесс многостадийный, и явления, происходящие в металле на каждой стадии, определяют его поведение на последующих. Рассмотрим последовательно эти стадии.

Таблица 1. Масштабные уровни явлений при обработке материалов

Уровни	Характерный размер
<u>Микроуровень</u>	
Вакансия, атом	2–3 А
Перегиб, порог	5–50 А
Дислокация	100 А
Группа дислокаций, полоса скольжения, граница	100–1000 А
<u>Мезоуровень</u>	
Ячейка, субзерно	– 1,0 мкм
Дислокационный ансамбль	– 20 мкм
<u>Уровень зерна</u>	
Зерно, дендрит	10–200 мкм
<u>Макроуровень</u>	
Участок образца	0,5–1 мм
Образец в целом	1–10 мм

Стадия нагрева. Наиболее технологичным при ВТМО ВО является скоростной индукционный нагрев, проводимый до температуры, незначительно превышающей температуру аустенизации (на 50–100 °С), что компенсирует его скоростной характер, но не позволяет развиваться процессам рекристаллизации и коагуляции зерен. Это определяет в дальнейшем значительное уменьшение размера действительного аустенитного зерна (10-11-й балл – ВТМО ВО, 7-8-й балл – объемная закалка). Это влияние на масштабном уровне зерна.

Стадия пластического деформирования. Характерной особенностью процесса винтового обжатия является возможность управления компонентами объемного деформированного состояния в очаге деформации за счет силовой схемы процесса и передача рабочих нагрузок при деформировании через металл заготовки. В [1–3] приводится вариативный ряд силовых схем винтового обжатия, реализация которых позволяет управлять величиной и знаком компонент объемного деформированного состояния – радиальной, тангенциальной, осевой деформациями, а также деформацией кручения и сдвига. Последняя наблюдается в поверхностных слоях деформируемой заготовки и появляется вследствие контактного трения между деформирующими роликами и заготовкой.

Так как при всех силовых схемах в процессе винтового обжатия рабочие нагрузки, необходимые для преодоления сопротивления деформированию металла, прикладываются через тело заготовки, то недопустимо под их воздействием нарушение сплошности металла и ее разрушение, что определяет ограничения по иерархическим уровням деформации в данном процессе, – это уровни дефектов трансляционного и ротационного типа.

Стадия охлаждения. При ВТМО ВО на стадии охлаждения производится закалка горячедеформированного аустенита, и в стали формируется мартенсит твердостью (48–50) HRC₃. Остаточного аустенита в структуре не обнаруживается, как и после штатной закалки. После ВТМО ВО размер кристаллов мартенсита составил 7–10 мкм, что свидетельствует

о получении более дисперсного среднегольчатого мартенсита [8], после штатной закалки размер кристаллов мартенсита 15–20 мкм, и такой мартенсит считается крупногольчатым [8]. В качестве примера в табл. 2 приведены характеристики мартенсита в стали 30ХН2МФА после различных видов упрочнения.

Таблица 2. Морфология мартенсита стали 30ХН2МФА после различных видов упрочняющей обработки

Вид обработки	Характеристики мартенсита			
	Размер игл, мкм	Ширина пакетов, мкм	Объемная доля пакетов	Объемная доля пластин
Штатная ТО	15–20	0,20	0,7	0,3
ВТМО с охлаждением наружной поверхности	7–10	0,13	0,7	0,3
ВТМО с охлаждением внутренней поверхности	7–10	0,13	0,75	0,25
ВТМО с охлаждением наружной и внутренней поверхностей	7–10	0,13	0,75	0,25

Установлено, что мартенсит состоит из двух морфологических составляющих – пакетов (пакетный мартенсит) и пластин (пластинчатый мартенсит).

Пакетный мартенсит представляет собой структурное образование, состоящее из набора отдельных параллельных друг другу реек, имеющих сложную структуру с высокой плотностью дислокаций. Средние размеры пакета после штатной закалки составляют: длина до 10,8 мкм; толщина около 0,77 мкм. В пределах одного аустенитного зерна при закалке возникает несколько таких пакетов, ширина которых после штатной закалки составляет 0,20 мкм а после ВТМО ВО – 0,13 мкм (табл. 2), что свидетельствует об измельчении аустенитного зерна при деформировании заготовок и возникновении при закалке в большем объеме более мелкого пакетного мартенсита. Размеры областей с рейками составляют 0,3–1 мкм, средние размеры пакетов и кристаллов мартенсита после ВТМО ВО в два раза меньше соответствующих размеров, полученных при штатной ТО. Длина составляет 1,06 мкм (на порядок меньше, чем после штатной ТО), ширина – 0,8 мкм.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ВТМО ВО способствует получению более мелкодисперсного мартенсита, что соответствует протеканию процессов на мезоуровне (табл. 1).

Стадия отпуска. Установлено, что структура стали представляет собой сорбит отпуска. Однако средние размеры зерен феррита в стали после ВТМО ВО в два раза меньше соответствующих размеров, полученных при серийной ТО. Размеры карбидов после ВТМО ВО более дисперсны (табл. 3), чем после штатной ТО.

Таблица 3. Средние количественные характеристики карбидной фазы

Вид обработки	Расположение карбида	Цементит			«Специальные» карбиды	
		ширина	толщина	длина	толщина	длина
		нм	нм	нм	нм	нм
Штатная ТО	По границам зерен	77	14–34	248	14–65	49
	В зерне	43	10–29	110	20–43	64
ВТМО с охлаждением наружной поверхности	По границам зерен	<u>74</u> 65	<u>20–28</u> 18–18	<u>117</u> 144	<u>17–47</u> 16–52	<u>75</u> 76
	В зерне	<u>59</u> 43	<u>15–18</u> 13–20	<u>126</u> 79	<u>14–38</u> 11–47	<u>43</u> 48
ВТМО с охлаждением внутренней поверхности	По границам зерен	<u>81</u> 97	<u>15/17</u> 17/22	<u>96</u> 131	<u>23/48</u> 15/40	<u>119</u> 68
	В зерне	<u>65</u> 43	<u>14/20</u> 10/19	<u>200</u> 173	<u>10/51</u> 8/34	<u>69</u> 32
ВТМО с охлаждением наружной и внутренней поверхностей	По границам зерен	<u>72</u> 112	<u>15–26</u> 19–27	<u>99,5</u> 195	<u>10–53</u> 14–41	<u>44</u> 76
	В зерне	<u>48</u> 62	<u>9/21</u> 12,0/15,5	<u>110</u> 218	<u>10/53</u> 14/41	<u>44</u> 76

В числителе приведены данные исследований областей, прилегающих к внутренней поверхности, в знаменателе – к наружной поверхности трубчатого образца.

Таким образом, на стадии отпуска при ВТМО процессы структурообразования проходят на микро- и мезомасштабных уровнях, определяя комплекс повышенных механических характеристик материала. На мезомасштабном уровне формируется и качество поверхности изделия.

На макроуровне при ВТМО ВО формируются такие показатели качества осесимметричных изделий, как точность размеров – 10-й квалитет и погрешности формы (непрямолинейность оси, овальность, разностенность – до 0,2 мм). Их высокий уровень формируется на всех стадиях процесса.

Таким образом, комплексное формирование повышенных конструктивно-технических характеристик осесимметричных изделий из конструкционных сталей при ВТМО ВО определяется комплексным характером:

- проведения процесса (нагрев, деформация, охлаждение);
- структурообразование и формирования показателей качества на всех масштабных уровнях:
 - на микроуровне – повышение плотности дислокаций;
 - на мезоуровне – формирование дисперсных пакетов и пластин мартенсита;
 - на уровне зерна – формирование зерна 10-11-го балла;
 - на макроуровне – формирование повышенной точности размеров и формы изделия.

При этом процесс деформирования при ВТМО ВО должен быть ограничен иерархическими уровнями деформаций, соответствующим дефектам

трансляционного и ротационного типа, исключая зарожение и распространение микро- и макротрещин в поперечном сечении заготовки и ее разрушение.

Библиографические ссылки

1. Аппаратура и методика измерения силовых параметров процесса ВТМО винтовым обжатием / О. И. Шаврин [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 3. – С. 78–81.
2. О некоторых особенностях пластической деформации в процессе ВТМО винтовым обжатием / О. И. Шаврин [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1986. – № 11. – С. 103–106.
3. Аппроксимативный подход к моделированию процесса пластического деформирования винтовым обжатием / О. И. Шаврин [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 9. – С. 49–51.
4. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин [и др.] // Изв. вузов. Физика. – 1982. – Т. 35. – № 6. – С. 3–27.
5. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Псахье С. Г. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы // Физическая мезомеханика. – 2004. – № 7. Спец. выпуск. – Ч. 1. – С. 25–39.
6. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
7. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В. Е. Панин [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
8. Толковый металлургический словарь. Основные термины / под ред. В. И. Куманина. – М.: Русский язык, 1989. – 446 с.

O. I. Shavrin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

V. B. Dementyev, Doctor of Technical Sciences, Institute of Applied Mechanics, UB of RAS, Izhevsk

N. A. Spichkin, Candidate of Technical Sciences, Institute of Applied Mechanics, UB of RAS, Izhevsk

On the Mesolevel Approach to Formation of Structure and Properties of Constructional Steels at Thermomechanical Hardening

The description of conditions of structure, properties and quality formation at thermomechanical hardening for products made of constructional steels is offered. The description is made from a perspective of a mesolevel scalings of processes that will allow system approaching to the strengthening process development for vital heavy duty parts.

Key words: mesolevel approach, thermomechanical hardening.