

УДК 621.789

**О. И. Шаврин**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ В МАТЕРИАЛЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Проведен анализ возможных вариантов технологий формирования наноразмерной структуры в материалах деталей машин. Показано, что такая структура может быть получена целенаправленным управлением параметрами высокотемпературной термомеханической обработки.*

**Ключевые слова:** детали машин, наноразмерная структура, высокотемпературная термомеханическая обработка.

**С**вязь понятий «реальный материал» и «нано» в любом сочетании – нанотехнология, наноматериалы, наночастицы – не может быть отвлеченной, диктуемой только новизной и интересом, но иметь вполне прагматическую цель – получить не просто нанометалл, а реальную конструкцию, изделие машиностроения из такого металла. Известно, что получить металл с какими-либо особыми свойствами – это одно, а изготовить из него деталь и использовать ее в конструкции – это другое и не всегда удается.

В качестве примера можно вспомнить про термомеханическую обработку: получить металл с ВТМО, хотя и с большими трудностями, удавалось, а детали, конструкции – нет.

То же и с наноматериалами: связать понятия «нано» и «реальный металл» с научной точки зрения интересно и важно, а добавление к этой связке еще и возможности получения деталей – интересно вдвойне.

Рассматривая возможную связь понятий «реальный металл», «изделие из него» и «нано» можно предложить своеобразный алгоритм рассмотрения проблемы.

1. Цель, которую нужно добиться. Целью может быть повышение эксплуатационных характеристик. Многообразие вариантов понятия «эксплуатационные характеристики» диктует и соответствующий набор средств достижения целей. Если говорить о машиностроительных деталях, то можно ограничить набор эксплуатационных характеристик хотя бы конструктивной прочностью. Конструктивная прочность – это и характер нагрузок (статические, ударные, циклические), температурные условия эксплуатации, соотношение уровня рабочих напряжений и характеристик прочности металла, состояние поверхности детали – наличие концентраторов напряжений и т. д.

2. Структурные факторы, определяющие уровень эксплуатационных характеристик.

Роль структурных факторов определяется характером эксплуатационного нагружения, в зависимости

от которого структурные факторы, обеспечивающие необходимый уровень работоспособности изделия, будут различны.

Сказанное приводит к выводу, что разрабатываемая схема реализации или получения «нано» в реальных металлах и конструкциях должна быть направлена на получение какой-либо определенной особенности структуры материала, которая будет определять работоспособность детали в условиях эксплуатации. Рассмотрим, можно ли связать понятие «нано» и возможность получения каких-либо наноизменений структуры материала деталей, испытывающих циклические нагрузки, или, как говорят, работающих на усталость.

Для такого класса деталей из большого количества факторов, определяющих работоспособность деталей в условиях циклического нагружения, можно выделить два структурных самостоятельных фактора – размеры элементов структуры и карбидных частиц, которые формируются технологией.

В настоящее время активно исследуются процессы интенсивной пластической деформации для формирования наноразмерной структуры (ИПД). Но если связывать этот процесс с возможностью получения какой-то реальной конструкции, то проблем здесь еще очень много.

Есть другой путь получения наноразмерной структуры в конструкционных сталях – высокотемпературная термомеханическая обработка. В ходе многолетних исследований в научных школах под руководством академика Садовского В. Д., профессора Бернштейна М. Л. было доказано, что основная причина упрочнения стали при ВТМО – образование субструктуры полигонального типа вследствие перестройки дислокаций, сформировавшихся в ходе высокотемпературной деформации. Было установлено, что образующийся при ВТМО мартенсит наследует тонкое строение деформированного аустенита. Это принципиальный результат, предопределяющий связь свойств высокопрочной стали с параметрами тонкого строения аустенита, создаваемого деформацией при ВТМО. Было показано также, что полиго-

нальная структура сохраняется в феррите при отпуске, влияя и на изменение процессов карбидообразования.

Дальнейшие исследования влияния ВТМО на свойства сталей показали, что первоначальное представление о ВТМО как о последовательности нагрева, деформации (по возможности большой) и немедленного, резкого охлаждения чрезвычайно упрощено. При формировании структуры металлического сплава, имеющего повышенную плотность и соответствующее распределение несовершенств строения, созданных пластической деформацией, в зависимости от ее условий может образоваться очень широкая область структур, начиная от дислокационных структур горячего наклепа, полигонизации и заканчивая рекристаллизацией. Во всем этом диапазоне изменения структур получается повышенный комплекс прочностных характеристик сталей. Даже стали с частично рекристаллизованной при ВТМО структурой (до 50 %) имеют повышенную прочность (обычно  $\sigma_{\text{вп}}$ ). Но уровень повышения свойств у сталей, диапазон их изменения зависят от очень большого набора факторов, влияющих на размерные параметры субструктуры и структуры и, соответственно, на уровень прочности. Не вызывает сомнения правильность сформировавшегося у исследователей убеждения, что прирост характеристик прочности зависит от их вида.

При исследовании влияния размеров субзерен на прочность было установлено, что эмпирическая зависимость Холла – Петча, найденная ими для размеров зерен в чистых металлах, не имеющих субструктуры,

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_y D^{-1/2},$$

где  $\sigma_0$  – напряжение, которое нужно приложить для преодоления трения решетки (сил Пайерлса – Набарро);  $k_y$  – величина, характеризующая степень блокировки и торможения дислокаций, работает и для металлов с развитой субструктурой при изменении размеров субзерен от 0,05 мкм (50 нм) до 70 мкм, когда в формулу вместо размеров зерен подставляются размеры субзерен. Это же было показано в работах М. Л. Бернштейна и других ученых при исследовании формирования субструктуры в процессе ВТМО на модельных сплавах, сохраняющих после охлаждения до комнатных температур аустенитное состояние с особенностями тонкого строения, сформировавшегося под влиянием высокотемпературной деформации. Результаты этих исследований показали, что полигональные субграницы могут давать вклад в упрочнение, превышающее упрочнение, вызываемое границами зерен. Существенное влияние на упрочнение оказывает плотность дислокаций, в разы увеличивающаяся при термомеханической обработке.

Это же показано в работе [1], где доказано, что кроме простой зависимости от зерна существует дополнительный эффект, связанный с субзернами, окруженными малоугловыми субграницами, которые являются препятствиями для дислокаций и способ-

ствуют увеличению напряжения течения. Малоугловые субграницы увеличивают трение при движении дислокаций внутри кристалла без соответствующего изменения размера зерна.

Сказанное о влиянии субструктуры на  $\sigma_T$  позволяет высказать сомнение в правильности утверждений, что с точки зрения влияния на прочность сталей необходимо рассматривать только наноразмерность зерен, имеющих большеугловые границы. Такие утверждения сегодня можно рассматривать как гипотезу, не подтвержденную результатами исследований, особенно применительно к реальным конструкциям и деталям. Оценка влияния границ зерен и субзерен на прочность не может быть однозначной, универсальной. Она будет разной для хрупких и вязких сталей, для характеристик сопротивления малым и большим пластическим деформациям. В работах профессора Рахштадта А. Г. убедительно показано, что сопротивление малым пластическим деформациям ( $\tau_{\text{упр}}$ ) определяется размерами субзерен.

Особого рассмотрения с точки зрения влияния зерен и субзерен заслуживает сопротивление сталей циклическому нагружению – усталостная прочность – в связи с тем, что детали работают при напряжениях меньших предела упругости. В этих условиях субзерна способствуют более равномерному задействованию систем микроскольжения в объеме металла, а малоугловые субграницы становятся эффективными препятствиями для движения дислокаций, уменьшающими опасность критических скоплений дислокаций, являющимися причиной зарождения усталостных трещин.

Таким образом в общей постановке можно предположить, что в определенных условиях нагружения сталей элементы субструктуры, разделенные малоугловыми границами, оказывают упрочняющее воздействие на металл.

Можно полагать, что на действенность этого предположения размер элементов субструктуры, в том числе и их наноразмерность, влияния оказывать не будет.

Размерность полигональной субструктуры при ВТМО должна определяться параметрами всех этапов процесса – температуры и способа нагрева, степенью и схемой деформации, способом и схемой охлаждения. На тип конечной структуры накладывается влияние и длительности всех этапов процесса.

Взаимосвязанное влияние параметров процесса при ВТМО на формируемую структуру и сопротивление деформации хорошо иллюстрируют кривые горячего деформирования (рис. 1).

Исследование структуры [2] горячедеформированной стали показало, что участки диаграммы горячего деформирования соответствуют разным типам субструктур – от состояния горячего наклепа до рекристаллизации. На рис. 2 приведены свойства стали 60С2А, которые были получены при испытании на кручение образцов, процесс горячего деформирования которых был прерван на соответствующем участке горячей деформации с последующей немедленной закалкой (классическая схема ВТМО).

Графики показывают, что изменение сопротивления малым пластическим деформациям (измерялось  $\tau_{пл}$ ) хорошо коррелирует с видом диаграммы горячего деформирования. Максимальные свойства получены при относительно небольших деформациях, соответствующих области вблизи пика диаграммы горячего деформирования, когда структура стали характеризуется признаками полигонизации.

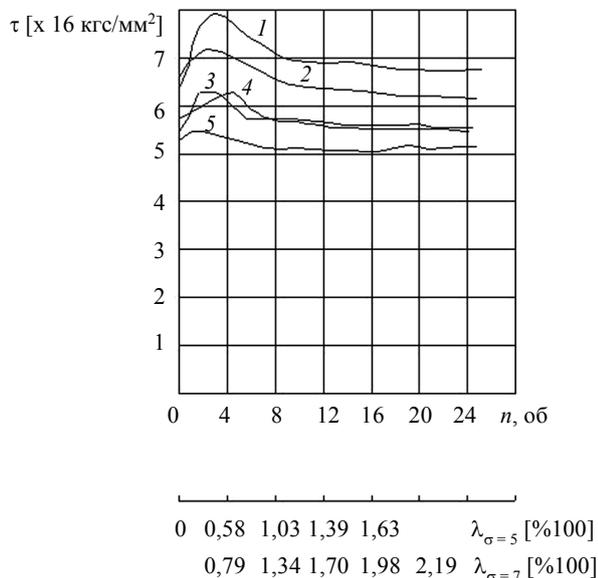


Рис. 1. Диаграммы горячего кручения:  
1, 2, 3 – стали 60Н20, 65С2ВА, 60С2А,  $T_{деф} = 900\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
4, 5 – стали 65С2ВА, 60С2А,  $T_{деф} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$

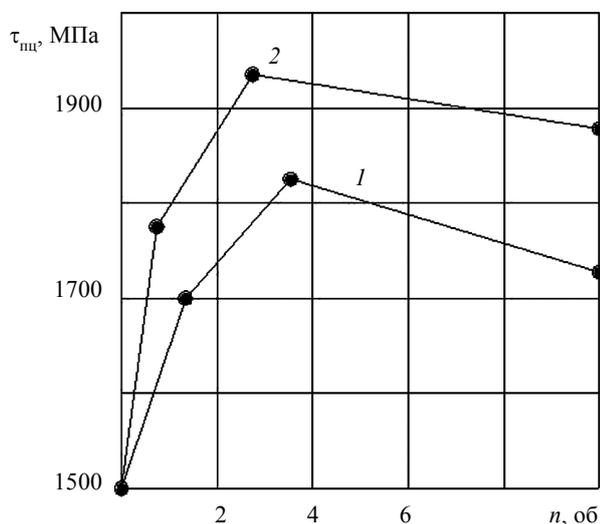


Рис. 2. Влияние ВТМО на свойства стали 60С2А:  
 $T_{деф} = 1020\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\omega = \text{об/мин}$ , 1 –  $\tau_{пл}$ ; 2 –  $\tau_{0,3}$   
(охлаждение без последеформационной выдержки)

Если изменить схему охлаждения – от немедленного перейти на охлаждение с последеформационной выдержкой – то это приведет к изменению сопротивления малым пластическим деформациям ( $\tau_{пл}$ ) в результате перестройки структуры (рис. 3).

Влияние последеформационных выдержек на сопротивление малым пластическим деформациям ( $\tau_{пл}$ ) стали 60С2А, подвергнутой ВТМО при деформации кручением, показано на (рис. 3).

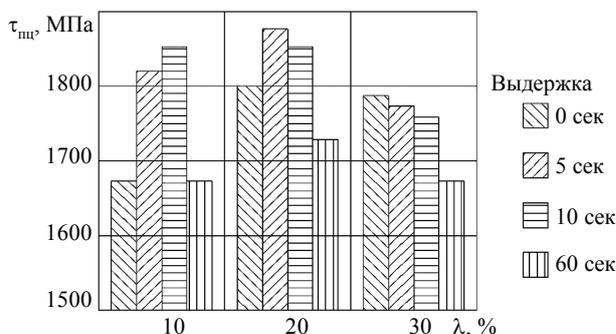


Рис. 3. Влияние степени деформации и последеформационной выдержки на сопротивление малым пластическим деформациям ( $\tau_{пл}$ ). Сталь 60С2А,  $T_{деф} = 1020\text{ }^\circ\text{C}$ , ТВЧ

Из диаграммы видно, что последеформационная выдержка различно влияет на изменение сопротивления малым пластическим деформациям в зависимости от величины горячей деформации. При малых деформациях (10–20 %) изменение свойств проходит через пик, в то время как при больших степенях (30 %) происходит монотонное снижение свойств. Такой характер зависимости согласуется со сложившимися представлениями о характере перестройки структуры горячедеформированной стали – образование полигонизированной структуры, увеличение полигонов во времени и переход на стадию рекристаллизации.

Приведенные данные показали, что, изменяя условия осуществления термомеханической обработки, причем в направлении уменьшения напряженности величин параметров (уменьшения степеней деформации, смягчения процесса охлаждения), можно обеспечить получение структуры, имеющей наноразмеры, и, соответственно, повышенного уровня свойств.

#### Список литературы

1. Инглиш А. Т., Бакофен У. А. Влияние обработки металлов на разрушение. – М.: Металлургия, 1976.
2. Добаткин С. В. Полигонизация и построение карт структурных состояний для оптимизации режимов горячей деформации: автореф. дис. – М., 1990.

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

#### Nanosized Structure Formation in Machine Part Material

Possible variants of technologies for the formation of nanosized structure in machine part materials are analyzed. It is shown that such structure can be produced with purposeful control of high-temperature thermal-mechanical treatment parameters.

**Key words:** machine elements, nanosized structure, high-temperature thermomechanical treatment.