

*А.С. Глинка, А.Н. Смирнов, Э.В. Козлов,  
Н.А. Конева, С.А. Рябов*

Кузбасский государственный технический университет

## **ВЛИЯНИЕ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 35ХГС<sup>1</sup>**

В настоящее время общепризнанна преобладающая роль поверхностного слоя в обеспечении эксплуатационных свойств деталей машин [1]. Именно поэтому исследование влияния различных технологий металлообработки на структурно-фазовое состояние поверхностных слоев изделий является актуальнейшей задачей.

Цель настоящей работы – изучение влияния различных режимов резания (механико-термической обработки) на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений в поверхностных слоях изделий (сталь 35ХГС), выявление закономерностей изменения акустических характеристик в зависимости от параметров структуры и напряжений для разработки неразрушающего метода оценки поверхностных слоев.

Изучение структуры проводили методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), просвечивающей дифракционной электронной микроскопии на тонких фольгах (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА). Акустические исследования проводили с помощью портативной многофункциональной акустической системы «Астрон», в основу работы которой положен современный спектральный импульсный метод акустической структуроскопии [2].

На первом этапе исследовали структурные состояния, поля внутренних напряжений и акустические характеристики заготовки в состоянии поставки на глубине 1,5 мм от поверхности, 1,0 мм от поверхности и строго на самой поверхности.

Установлено, что поверхностный слой исследованной заготовки имеет полностью фрагментированную структуру, состоит из микрозеренной феррито-перлитной смеси. Слой на глубине 1,5 мм от поверхности (рис. 1) состоит из 20 % феррита и 80 % несовершенного перлита (40 % пластинчатого, 20 % глобулярного и 20 % смешанного), а на глубине 1,0 мм – из 30 % феррита и 70 % перлита (перлит становится несовершенным). На границах фрагментов присутствуют мелкие

(приблизительно 10 нм) наночастицы карбидной фазы (цементита). На поверхности изделия содержится небольшое количество цементита; объемная доля частиц цементита размером приблизительно 10 нм, расположенных на границах фрагментов, составляет 0,6 %, а объемная доля частиц цементита размером на порядок выше (приблизительно 0,1 мкм), расположенных в объеме материала случайным образом, составляет 0,2 %. В исследованном металле наблюдается градиентная структура [3]. Внутренние напряжения снижаются в направлении от поверхности в глубину изделия (до 1,5 мм). В направлении к поверхности возрастает избыточная плотность дислокаций ( $\rho_{\pm}$ ); скалярная плотность дислокаций ( $\rho$ ) почти постоянна. Статистически запасенные дислокации отсутствуют на поверхности изделия ( $\rho_s = 0$ ) и накапливаются в глубине (до 1,5 мм).

Плотность геометрически необходимых дислокаций на поверхности изделия, где фактически расположена градиентная структура, максимальна ( $\rho_G = \max$ ); в исходном материале на глубине 1,5 мм геометрически необходимые дислокации полностью отсутствуют ( $\rho_G = 0$ ). Время задержки поверхностных акустических волн изменялось в пределах 90 – 100 нс на поверхности заготовки и до 20 нс на расстоянии 1,5 мм от поверхности.

На втором этапе работы изучали влияние механико-термической обработки на изменение структурно-фазового состояния поверхностных слоев исходной заготовки в зонах, исследованных ранее до обработки (образец 2.1 на глубине 1,5 мм от поверхности, образец 2.2 на глубине 1,0 мм от поверхности). При механико-термической обработке по периметру детали (диам. 31 мм) со скоростью 1000 об/мин снимали металлическую стружку до глубины 1 мм (получистовый режим) (образец 2.2), далее заготовку подвергали чистовому режиму обработки, а именно, дополнительно снимали металлическую стружку еще на глубину 0,5 мм со скоростью 1200 об/мин (образец 2.1). Величина подачи при получистовом режиме составляла 0,25 мм/об, при чистовом – 0,15 мм/об.

Структурное состояние стали 35ХГС в образцах 2.1 и 2.2 после обработки значительно отличается от ис-

<sup>1</sup> Исследования выполнены в рамках программы Министерства образования РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. (гос. контракт № 02.740.11.0033).

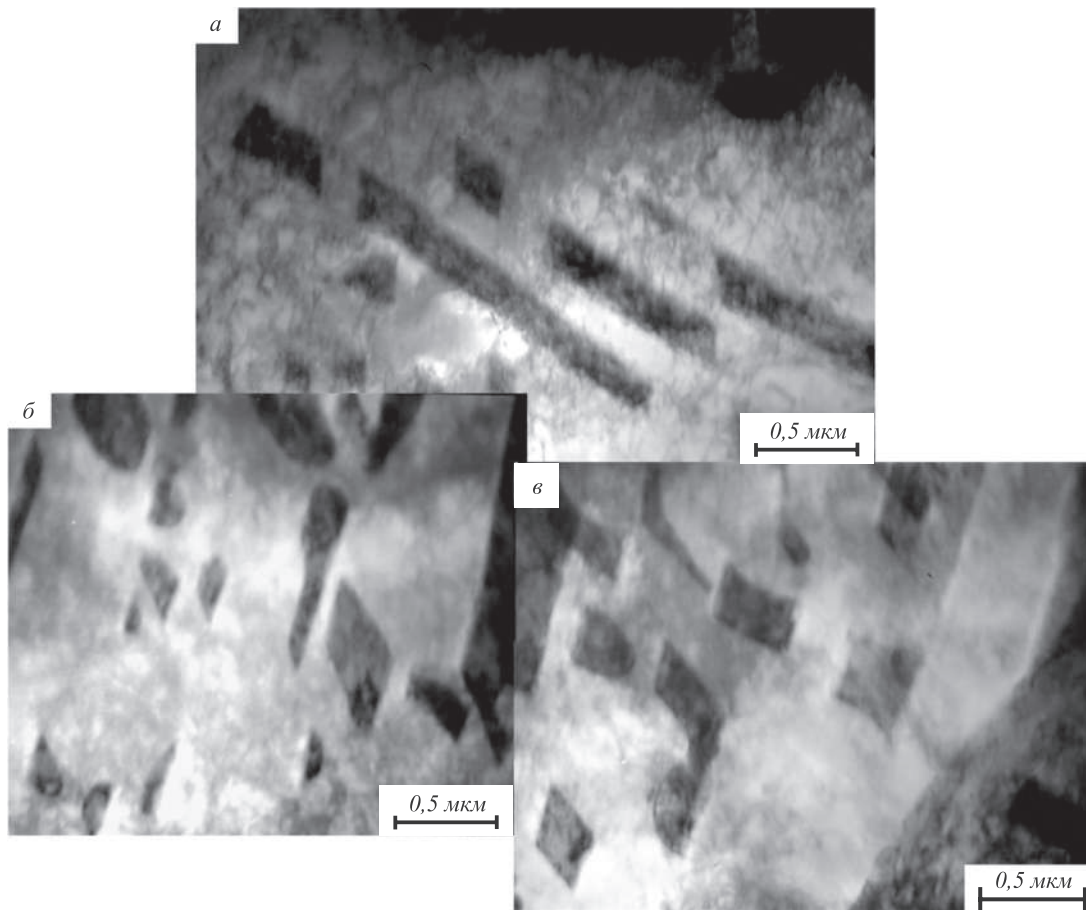


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 35ХГС на расстоянии 1,5 мкм от поверхности:  
 а – пластинчатый дефектный перлит; б, в – пластинчатый разрушенный перлит

ходного. Ферритные зерна во всех образцах присутствуют в двух состояниях: в нефрагментированном и во фрагментированном. Механико-термическое воздействие привело к серьезным изменениям морфологии цементита и его формы, в содержании и распределении внутри образца (рис. 2). Это означает, что процесс изготовления изделия приводит к пластическому деформированию цементита; при получистовой обработке обнаружены фазовые превращения цементита. Цепочка фазовой трансформации цементита, исходя из результатов вышеизложенных исследований, выглядит следующим образом:  $Fe_3C \rightarrow Fe_3C + Fe_{20}C_9 \rightarrow Fe_{20}C_9 \rightarrow Fe_{20}C_9 + Fe_4C \rightarrow Fe_4C$ .

В ходе разрушения цементита происходит не только изменение морфологии, но меняется тип фазы, стехиометрия, кристаллическая решетка. Внутренние поля напряжений ( $\sigma_{л}$ ), образованные за счет дислокаций «леса», и локальные внутренние поля напряжений ( $\sigma_{лок}$ ) измеряли методом ПЭМ по величине скалярной плотности дислокаций и кривизны-кручения кристаллической решетки соответственно. Сравнение результатов показывает, что внутренние напряжения во всех морфологических составляющих стали по мере изготовления изделия изменяются незначительно. Значение  $\sigma_{л}$  в образце 2.1 достигает 550 МПа, а значение  $\sigma_{лок}$  – 400 МПа. На второй

стадии обработки (образец 2.2) значение  $\sigma_{л}$  снижается и достигает 450 МПа, а значение  $\sigma_{лок}$  увеличивается до 550 МПа. Значение  $\sigma_{л}$  в феррите выше, чем в перлите, а значение  $\sigma_{лок}$ , наоборот, ниже. На последней стадии изготовления изделия  $\sigma_{л} \approx \sigma_{лок}$ , причем и в феррите, и в перлите эти напряжения практически одинаковы. Скалярная плотность дислокаций мало изменяется при переходе от одной стадии изготовления изделия к другой. Время задержки поверхностных акустических волн на поверхности заготовки изменялось по мере изготовления изделия от 70 нс после получистовой обработки до 55 нс после чистовой обработки.

Третий этап работы посвящен выбору режимов механико-термической обработки с целью получения оптимального структурно-фазового состояния с низким уровнем полей внутренних напряжений для минимизации затрат на изготовление изделий и для повышения их качества. Заготовки из стали 35ХГС в исходном состоянии подвергали обработке по пятнадцати различным режимам, в дальнейшем исследовали микроструктурное состояние поверхностных слоев. Оптимальный поверхностный слой дает обработка, характеристики (глубина  $t$  снятого слоя, число  $n$  оборотов, подача  $S$ ) которой приведены ниже (в числителе и знаменателе для черногового и чистового режимов соответственно):

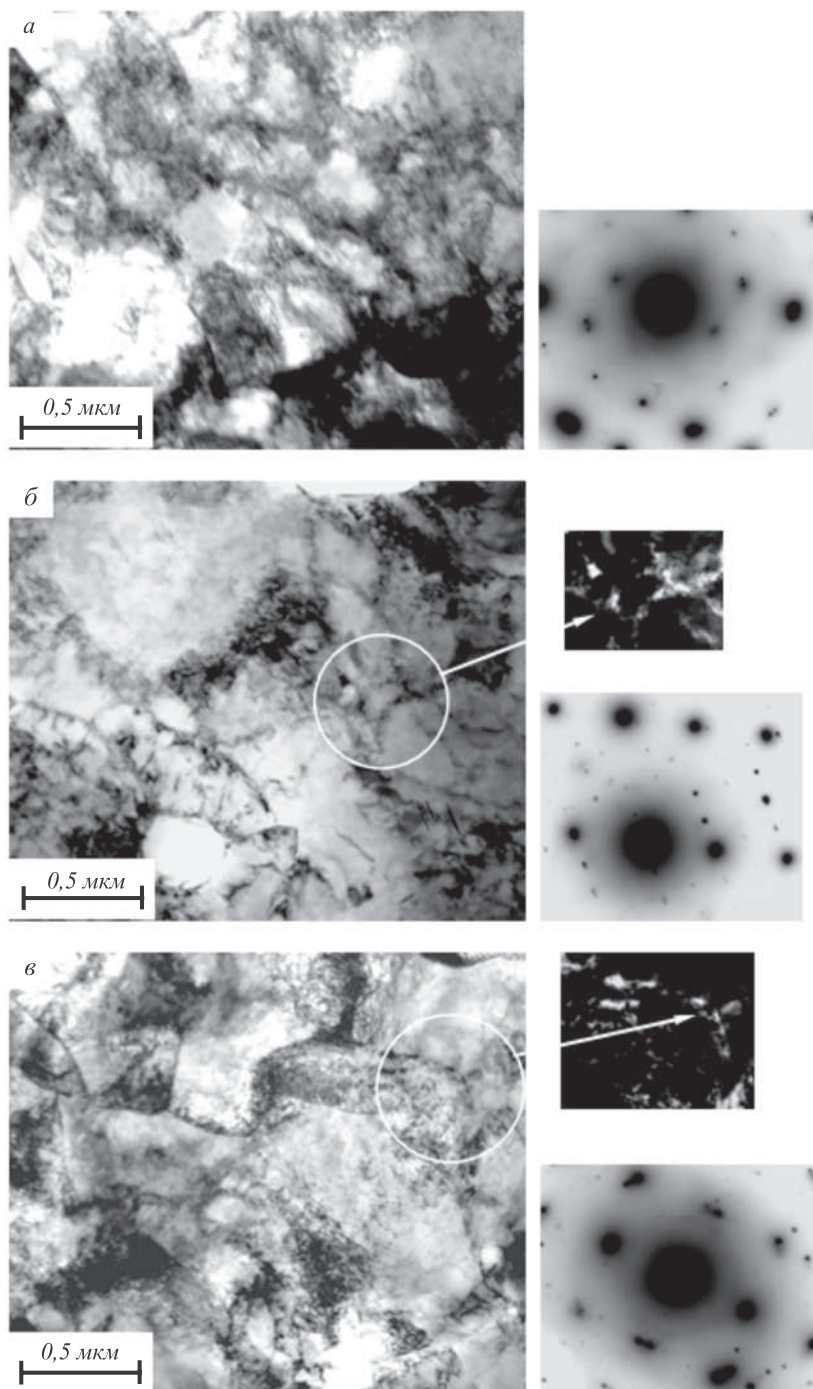


Рис. 2. Светлопольные изображения, соответствующие им микродифракционные картины и темнопольные изображения, полученные с участков, отмеченных окружностью и стрелкой белого цвета (рефлекс [130]), частиц цементита на границах фрагментов  $\alpha$ -фазы образца 2.1 (а), 2.2 (б) и готового изделия (в)

Образец	$t$ , мм	$n$ , об/мин	$S$ , мм/об
3.1	1,0/-	1000/1200	0,40/-
3.2	1,0/0,5	1000/1200	0,50/0,15
3.3	1,0/0,5	1000/1200	0,50/0,15

Как показали проведенные методом ПЭМ исследования, ферритные зерна во всех образцах присутствуют во фрагментированном состоянии, в образце 3.3 фрагментация выражена наиболее сильно.

Механико-термическое воздействие на всех стадиях изготовления изделия привело к серьезным изменениям в морфологии цементита, к его формоизменению, к перераспределению цементита внутри образца. Цементитные пластины внутри перлитных зерен пластически деформируются скользящими дислокациями относительно легко, в то время как крупные частицы цементита по границам  $\alpha$ -зерен часто испытывают только упругую деформацию. В результате этого в крупных частицах накапливаются значительные упру-

гие напряжения. На второй стадии изготовления изделия (образец 3.2) фрагментация охватывает весь объем материала. Объемная доля пластинчатого перлита уменьшается, а глобулярного перлита незначительно увеличивается. Внутренние напряжения во всех морфологических составляющих стали уменьшаются по мере изготовления изделия (рис. 3). Средняя по материалу скалярная плотность дислокаций постепенно уменьшается при переходе от одной стадии изготовления изделия к другой. Время задержки поверхностных акустических волн изменялось по мере изготовления изделия от 75 нс после чернового режима (образец 3.1) до 30 нс после чистовой обработки (образец 3.3).

**Выводы.** Механико-термическое воздействие приводит к изменениям структурно-фазового состояния поверхностных слоев заготовок из стали 35ХГС. Выбран оптимальный режим обработки, при котором на поверхности изделия формируется структурное состояние с минимальным (250 – 300 МПа) уровнем внутренних напряжений. Показано наибольшее влияние локальных полей внутренних напряжений, возникающих в стали 35ХГС после механико-термической обработки, на изменение акустических характеристик.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Су слов А.Г. – В кн.: Инженерия поверхности. Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». – М.: Машиностроение, 2001. № 4. С. 3 – 9.
2. Смирнов А.Н., Козлов Э.В. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушений паропроводов из стали 12Х1МФ. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2004. – 163 с.

3. Градиентные структуры в перлитной стали / Э.В. Козлов, В.Е. Громов, В.В. Коваленко и др. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2004. – 224 с.

© 2012 г. А.С. Глинка, А.Н. Смирнов, Э.В. Козлов, Н.А. Конева, С.А. Рябов  
Поступила 19 апреля 2011 г.

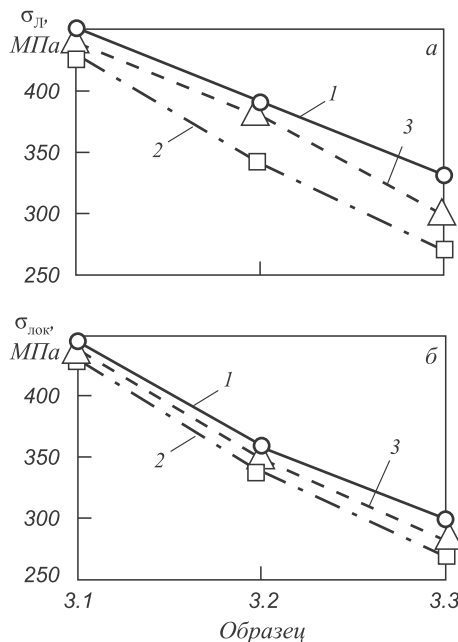


Рис. 3. Изменение амплитуды внутренних напряжений за счет дислокаций «леса» (а) и локальных внутренних напряжений (б) в стали 35ХГС на различных этапах изготовления изделия:

1 – в перлите; 2 – в феррите; 3 – в среднем по материалу

УДК 669.15

**Д.А. Бессонов<sup>1</sup>, С.В. Воробьев<sup>1</sup>, В.Е. Громов<sup>1</sup>,  
Ю.Ф. Иванов<sup>2</sup>, В.Я. Целлермаер<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН

**ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20Х13, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ<sup>1</sup>**

Подавляющее большинство промышленных сталей является поликристаллическими материалами, структура которых формируется в материале при различных способах обработки и существенно влияет на его свойства. Важнейшими параметрами зеренной структуры являются средний размер зерна, степень совершенства зерен, характер и степень разнорзерности

материала, наличие и характер текстуры, степень неравноосности зерен [1, 2]. В области температур, при которых большеугловые границы приобретают способность к перемещению, в поликристаллических материалах протекают рекристаллизационные структурные изменения, которые приводят к замене одних зерен другими, обладающими меньшей энергией [1, 2].

Одним из эффективных методов воздействия на зеренную структуру материалов является обработка интенсивными импульсно-периодическими электронными пучками, преимущество которой состоит в сочетании полного поглощения энергии электронов и объемного характера

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.» (гос. контракт № 02.740.11.0538) и гранта президиума РАН (проект № 27.4).