

## УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛИ 15Х2НМФА ПОСЛЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

**О.И. Запорожец, С.А. Котречко, Н.А. Дордиенко, В.А. Михайловский, А.В. Зацарная**  
**Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина**

Выполнены прецизионные измерения объемных скоростей ультразвука (УЗ) в образцах из стали 15Х2НМФА в ортогональных направлениях после одноосного сжатия (ОС) на степень деформации  $\varepsilon = 0 \dots 60\%$ . На основе полученных данных и использованной теоретической базы рассчитаны остаточные макронапряжения (ОМН) для разных  $\varepsilon$  с учетом текстурного вклада. Определены коэффициенты распределения ориентаций кристаллитов (текстурные коэффициенты  $W_{4i0}$ ) и построены полюсные фигуры, по которым определена относительная интенсивность дифракционных линий ( $\Delta I_{[ijk]}$ ) для главных кристаллографических направлений. Выявлены особенности в зависимостях исследованных величин от  $\varepsilon$  и дано объяснение наблюдаемым эффектам.

Известно, что пластическая деформация металлов может приводить к возникновению внутренних ориентированных микро- и макронапряжений (ОрМН), которые существенно влияют на их механические свойства при повторном нагружении. Но в литературе разными авторами высказываются противоположные мнения относительно величины и знака этих напряжений. Так в работе [1] на основе рентгеновских исследований установлено, что знак ОрМН противоположен знаку внешних деформирующих напряжений. В [2, 3] наоборот показано, что независимо от внешних напряжений ОрМН всегда являются сжимающими. Эти противоречия могли быть связаны с несовершенством рентгеновской методики измерений и обработки экспериментальных данных. Авторы работы [4], по их мнению, учли несовершенство рентгеновской методики предшественников и показали, что пластические деформации: как однократная, так и знакопеременная, гетерогенных сплавов вызывают трехосные ОрМН со знаком, противоположным направлению последней деформации. В работе [5] авторы обнаружили и обсудили эффект изменения механизмов хрупкого разрушения от транскристаллического для недеформированной корпусной стали 15Х2МФА к интеркристаллическому после пластической деформации сжатием, что также может иметь отношение к процессам образования в сплавах остаточного напряженного состояния. Остаточные макронапряжения (ОМН) в различных металлических агрегатах исследованы многими специалистами с помощью ультразвукового (УЗ) метода (см., например, [6–11] и приведенные там ссылки). Для реализации последнего используется явление акустоупругости, которое основано на зависимости упругих модулей и соответствующих скоростей УЗ от величины и направления действующих на прозвучиваемом участке образца (детали, изделия) макронапряжений. Существенным достоинством УЗ-метода наряду с возможностью сканирования образца УЗ-пучком является возможность диагностировать напряженное

состояние не только в приповерхностных слоях, но и в его объеме. В работах [12, 13] для изучения пространственного распределения ОМН в образцах из поликристаллического хрома, подвергнутых предварительной термоциклической обработке (ТЦО), использован способ УЗНК макронапряжений в аномальных материалах [14]. Способ базируется на зависимости температуры фазового превращения (для Сг температуры Нееля  $T_N$ ) и соответствующих УЗ-аномалий от суммы диагональных компонент тензора макронапряжений ( $\sigma_{ii}$ ). Для получения зависимости  $\sigma_{ii}$  от координаты прозвучиваемого участка образца на каждом участке регистрировалась температурная зависимость скорости УЗ, и по смещению минимума  $\nu(T)$  относительно его положения в исходном образце определялось значение  $\sigma_{ii}$ . На тех же образцах рентгеновским методом были определены ОМН в приповерхностных слоях и построена полная эпо́ра ОМН в хrome после ТЦО. На основании полученных результатов показано, что остаточные напряжения в объеме обработанного образца и на его поверхности отличаются по величине и имеют противоположный знак. В случае изменения размеров напряженного образца, например путем травливания, происходит перераспределение ОМН, и погрешность определения последних увеличивается. Результаты [12, 13] свидетельствуют о сложности оценки напряженного состояния в объеме образца (детали, изделия) только по данным, полученным из приповерхностных слоев. Целью настоящей работы было изучение УЗ-методом остаточного напряженного состояния в объеме образцов из корпусной стали 15Х2НМФА после пластической деформации путем одноосного сжатия (ОС) с использованием эффекта акустоупругости. С этой целью в работе были осуществлены прецизионные измерения продольной ( $\nu_l$ ) и поперечной ( $\nu_t$ ) скоростей УЗ в ортогональных направлениях, а также плотности ( $\rho$ ) в исходном и продеформированных образцах. На основе полученных данных рассчитаны ОМН для различных степеней деформации ( $\varepsilon$ ) с учетом текстурного вклада, а также найдены коэффициенты

распределения ориентаций кристаллитов (текстуры коэффициенты  $W_{4i0}$ ) и построены полюсные фигуры (ПФ), по которым определена относительная интенсивность дифракционных линий ( $\Delta I_{(ijk)}$ ) для главных кристаллографических направлений текстурированных образцов.

### НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Определение одно-, двух- и трехосных макронапряжений (МН) в поликристаллических агрегатах с помощью измерений скоростей УЗ освещено во многих работах [6–11, 15, 16]. Ниже, с учетом поставленной задачи, будет кратко рассмотрен только случай с одноосными МН.

Согласно [8] для направления распространения УЗ-волны (ориентации ее волнового вектора  $\vec{k}$ ) в изотропном образце параллельно направлению приложения одноосных МН ( $\vec{k} \parallel \vec{\sigma}$ ) получено:

$$\rho v_i^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3K} \left[ 2l + \lambda + \frac{(\lambda + \mu)}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right], \quad (1)$$

$$\rho v_i^2 = \mu + \frac{\sigma}{3K} \left[ m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right]. \quad (2)$$

В направлении, перпендикулярном к направлению действия напряжений ( $\vec{k} \perp \vec{\sigma}$ ), имеем:

$$\rho v_i^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3K} \left[ 2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right]; \quad (3)$$

$$\rho v_{i1}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3K} \left[ m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right]; \quad (4)$$

$$\rho v_{i2}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3K} \left[ m - \frac{(\lambda + \mu)n}{2\mu} - 2\lambda \right], \quad (5)$$

где  $\sigma$  – положительное для растягивающих напряжений и отрицательное для напряжений сжатия;  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно поперечная волна, поляризованная вдоль ( $\vec{s} \parallel \vec{\sigma}$ ) и перпендикулярная ( $\vec{s} \perp \vec{\sigma}$ ) направлению приложения напряжений;  $\lambda$ ,  $\mu$  – константы Ламе для изотропного тела;  $l$ ,  $m$ ,  $n$  – константы третьего порядка Мурнагана;  $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$  – модуль всестороннего сжатия;  $\rho$  – плотность среды в ненапряженном состоянии.

Из (2) видно, что поперечная скорость УЗ в направлении приложенного напряжения не зависит от ориентации вектора поляризации  $\vec{s}$ , что является важным признаком отсутствия макронапряжений в других направлениях.

Из уравнений (4) и (5) в рамках приближения первого порядка по  $\sigma$  получаем:

$$\sigma = \frac{2\mu}{1 + n/4\mu} \times \frac{v_{i1} - v_{i2}}{\langle v_{i1,2} \rangle}, \quad (6)$$

где  $\langle v_{i1,2} \rangle$  – поперечная скорость в ненапряженном состоянии, которая может быть

заменена выражением  $\frac{v_{i2} + v_{i1}}{2}$ . С учетом текстурного вклада (второй член числителя в скобках)

$$\sigma = \frac{\rho[(v_{i1}^2 - v_{i2}^2) - (v_{i1o}^2 - v_{i2o}^2)]}{1 + n/4\mu}, \quad (7)$$

где  $v_{i1o}$ ,  $v_{i2o}$  – соответствующие поперечные скорости в ненапряженном текстурированном агрегате. Или аналогично (6)

$$\sigma \approx \frac{2\mu}{1 + n/4\mu} \times \left( \frac{v_{i1} - v_{i2}}{\langle v_{i1,2} \rangle} - \frac{v_{i1o} - v_{i2o}}{\langle v_{i1o,2o} \rangle} \right). \quad (8)$$

Анализ литературных данных и собственных результатов исследований авторов данной работы показал, что текстурный вклад в анизотропию поперечной, а также релеевской скоростей звука в десятки раз превышает аналогичный вклад от ОМН в сталях. Указанный факт обуславливает важность использования теоретической базы для выбора скоростей в выражениях типа (7) и (8) применительно к конкретной экспериментальной ситуации.

### УЗ-МЕТОД ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Метод также подробно освещен в литературе (см., например, [17–19]) и широко используется в современных научных и заводских лабораториях. В основу метода положено представление о текстурированном агрегате как о квази-монокристалле с более низкой кристаллографической симметрией, чем у кристаллитов.

На рис. 1 приведен схематический вид прокатанного образца в форме прямоугольного параллелепипеда в ортогональной системе координат с возможными для измерений шестью поперечными ( $v_{ij}$ ) скоростями УЗ ( $i, j = 1, 2, 3$ ). Ось 1 указывает направление прокатки (НП) – RD; 2 – поперек прокатки (ПП) – TD и 3 – направление деформации (НД) – ND. 1-й индекс при  $v_{ij}$  указывает направление распространения, а 2-й – вектора поляризации УЗ-волны в образце.

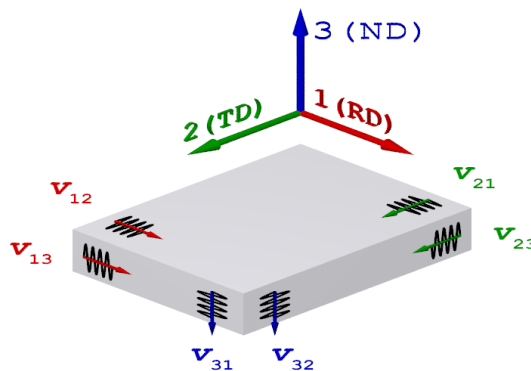


Рис. 1. Схематический вид прокатанного образца для измерений объемных скоростей УЗ и текстурного анализа анизотропных поликристаллов

Кроме указанных поперечных в ортогональных направлениях возможно измерять также три продольные скорости УЗ ( $v_{ii}$ ). ОС является частным случаем деформации прокаткой с равноценными осями 1 и 2, что позволяет использовать данную теоретическую базу для случая ОС.

Связь между эффективными упругими коэффициентами ( $C'_{ij}$ ), соответствующими скоростями звука ( $v_{ij}$ ) и искомыми текстурными коэффициентами ( $W_{ijk}$ ) для кубических поликристаллов может быть представлена следующими выражениями:

$$C'_{11} = \rho v_{11}^2 = K + \frac{4}{3} \mu + \quad (9)$$

$$+ C^a \frac{12}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} - \frac{2}{3} \sqrt{10} W_{420} + \frac{1}{3} \sqrt{70} W_{440} \right);$$

$$C'_{22} = \rho v_{22}^2 = K + \frac{4}{3} \mu + \quad (10)$$

$$+ C^a \frac{12}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} + \frac{2}{3} \sqrt{10} W_{420} + \frac{1}{3} \sqrt{70} W_{440} \right);$$

$$C'_{33} = \rho v_{33}^2 = K + \frac{4}{3} \mu + C^a \frac{32}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_{400}; \quad (11)$$

$$C'_{44} = \rho v_{23,32}^2 = \mu - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right); \quad (12)$$

$$C'_{55} = \rho v_{13,31}^2 = \mu - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right); \quad (13)$$

$$C'_{66} = \rho v_{12,21}^2 = \mu + C^a \frac{4}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} - \sqrt{70} W_{440} \right); \quad (14)$$

$$C'_{23} = K - \frac{2}{3} \mu - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right) = \quad (15)$$

$$= K - \frac{5}{3} \mu + C'_{44};$$

$$C'_{13} = K - \frac{2}{3} \mu - C^a \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right) = \quad (16)$$

$$= K - \frac{5}{3} \mu + C'_{55};$$

$$C'_{12} = K - \frac{2}{3} \mu + C^a \frac{4}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left( W_{400} - \sqrt{70} W_{440} \right) = \quad (17)$$

$$= K - \frac{5}{3} \mu + C'_{66},$$

где  $C^a$  – фактор анизотропии, который рассчитывается по упругим коэффициентам кристаллитов. Индекс  $a$  указывает на способ усреднения: ( $a = V$ ) – по Фогту, ( $a = R$ ) – по Ройсу и ( $a = H$ ) – по Фогту-Ройсу-Хиллу. При этом

$$C^V = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}; \quad (18)$$

$$C^R = \frac{50(C_{11} - C_{12} - 2C_{44})(C_{11} - C_{12})C_{44}}{[3(C_{11} - C_{12}) + 4C_{44}]^2}; \quad (19)$$

$$C^H = \frac{C^V + C^R}{2}, \quad (20)$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  и  $C_{44}$  – упругие константы монокристалла материала.

В выражениях (12)–(14)

$$v_{ij,ji} = \frac{v_{ij} + v_{ji}}{2} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad - \text{усредненные по}$$

симметричным индексам поперечные скорости УЗ. Неравенство  $v_{ij} \neq v_{ji}$  указывает на наличие в материале действующих или остаточных макронапряжений [15,16]:

$$\sigma = \rho(v_{ij}^2 - v_{ji}^2). \quad (21)$$

С учетом этого, для случая одноосного сжатия образцов в соответствии с рис. 1 выражение (7) можно записать в виде

$$\sigma_3 = \frac{\rho[(v_{i3}^2 - v_{ij}^2) - (\langle v_{i3,3i}^2 \rangle - \langle v_{ij,ji}^2 \rangle)]}{1 + n/4\mu}, \quad (22)$$

где индекс 3 при  $\sigma$  означает направление ОС и ОМН;  $i = 1, 2; j = 2, 1; \langle v_{i3,3i}^2 \rangle = \frac{v_{i3}^2 + v_{3i}^2}{2}$

$$\text{и } \langle v_{ij,ji}^2 \rangle = \frac{v_{i2}^2 + v_{2i}^2}{2}.$$

Построение полюсных фигур по коэффициентам  $W_{400}$ ,  $W_{420}$  и  $W_{440}$ , рассчитанным по выбранным из уравнений (9)–(14) трем скоростям УЗ, осуществляется с использованием выражения [20]:

$$q(\zeta, \eta) = 1/4 + S_4 [P_4^0(\zeta)W_{400} + P_4^2(\zeta)W_{420} \cos 2\eta + P_4^4(\zeta)W_{440} \cos 4\eta] + S_6 [P_6^0(\zeta)W_{600} + P_6^2(\zeta)W_{620} \cos 2\eta + P_6^4(\zeta)W_{640} \cos 4\eta + P_6^6(\zeta)W_{660} \cos 6\eta], \quad (23)$$

где  $S_4 = S_6 = 2\pi$  для полюсной фигуры (100);  $S_4 = -\pi/2$ ,  $S_6 = -13\pi/4$  для полюсной фигуры (110);  $S_4 = -4\pi/3$ ,  $S_6 = -32\pi/9$  для полюсной фигуры (111). При этом членами с коэффициентом  $W_{6j0}$  пренебрегаем в силу их относительной малости.

## МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы на первом этапе изготовления вырезались из фрагмента стенки корпуса реактора ВВЭР-1000 в виде цилиндров высотой  $h = 30$  мм и диаметром  $d = 25$  мм, которые были подвергнуты предварительному ОС при комнатной температуре на  $\epsilon = 10, 20, 30, 40, 50$  и  $60\%$ . После этого из них изготовляли образцы в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами  $10 \times (8 \dots 10) \times (8 \dots 10)$  мм. Одно из этих направлений – 3, совпадало с направлением ОС. Направления 1 и 2 были нормальны к соответствующим плоскостям образца. УЗ-измерения осуществлялись на частотах  $10 \dots 30$  МГц с помощью автоматизированной установки, той же, что использовалась в [21, 22]. Время задержки эхо-сигнала ( $\tau$ ), по величине которого и длине акустического пути определялась скорость УЗ, измерялось путем фиксации прохождения через нулевое значение заданного периода высокочастотного заполнения УЗ-радиоимпульса с образца. Абсолютная инструментальная погрешность измерений  $\tau$  не

превышала 1 нс, а относительная – на порядок ниже. Соответствующая погрешность измерений скорости УЗ была  $10^{-4}$  отн. ед. на временной базе 10 мкс. Плотность образцов  $\rho$  измерялась дифференциальным методом гидростатического взвешивания с использованием кварцевого или германиевого эталонов с погрешностью  $10^{-4}$  отн. ед. при массе образца 10 г. Остаточные напряжения определялись по анизотропии поперечных скоростей УЗ в направлениях, перпендикулярных к действию ОС, а компенсирующий текстурный вклад в ОМН – путем усреднения измеренных скоростей по симметричным индексам. Использованное программное обеспечение позволяло при построении полюсных фигур оценивать относительную интенсивность дифракционных линий:  $\Delta I_{[ijk]} = I_{[ijk] \max} - I_{[ijk] \min}$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости от степени деформации образцов плотности ( $\rho$ ), относительных изменений продольной ( $\Delta v_{ij}/v_{i0}$ ) и поперечной ( $\Delta v_{ij}/v_{j0}$ ) скоростей УЗ вдоль и поперек направления ОС и их анизотропии показаны на рис. 2 и 3.

Видно, что плотность и все скорости УЗ после деформации путем ОС уменьшаются по сравнению со своими исходными величинами. При этом наибольшее влияние ОС наблюдается на первых (до  $\varepsilon \leq 10...30\%$ ) стадиях деформации. При более высоких  $\varepsilon$  влияние деформации ослабляется, а скорости УЗ с увеличением  $\varepsilon$  растут, но остаются ниже своих исходных величин. Аномально зависит от степени деформации и анизотропия  $v_l$  и  $v_t$ , которая, с одной стороны, является мерой макронапряжений в материале [6, 7], а с другой, – одновременно может быть связана с образованной и изменяющейся в процессе деформирования текстурой [8, 10, 11]. Как было установлено, поперечная скорость УЗ вдоль направления ОС ( $v_{3j}$ ) не проявляет анизотропии при вращении вектора поляризации в плоскости, нормальной к направлению деформации, что свидетельствует об отсутствии остаточных напряжений в других геометрических направлениях. При распространении поперечной УЗ-волны перпендикулярно направлению ОС наблюдается существенная анизотропия  $v_{ij}$  и ее зависимость от направления вектора поляризации  $\vec{s}$  и степени деформации  $\varepsilon$ . При этом при ориентации  $\vec{s}$  вдоль направления ОС ( $ij = 23, 13$ ) изменения  $v_l$  с увеличением  $\varepsilon$  значительно больше, чем у поперечной скорости с поляризацией в перпендикулярном к ОС направлении ( $ij = 12, 13, 21, 23$ ).

Последнее связано с особенностями формирования в образцах при их деформировании аксиальной текстуры (результаты приведены ниже). На рис. 4 приведены рассчитанные по формуле (22) остаточные макронапряжения вдоль оси 3 для различных значений  $\varepsilon$ . При этом расчет осуществлялся по поперечным скоростям УЗ  $v_{ij}$  в

направлениях 1 и 2 (см. рис. 1) с поляризацией вдоль и поперек действия ОС.

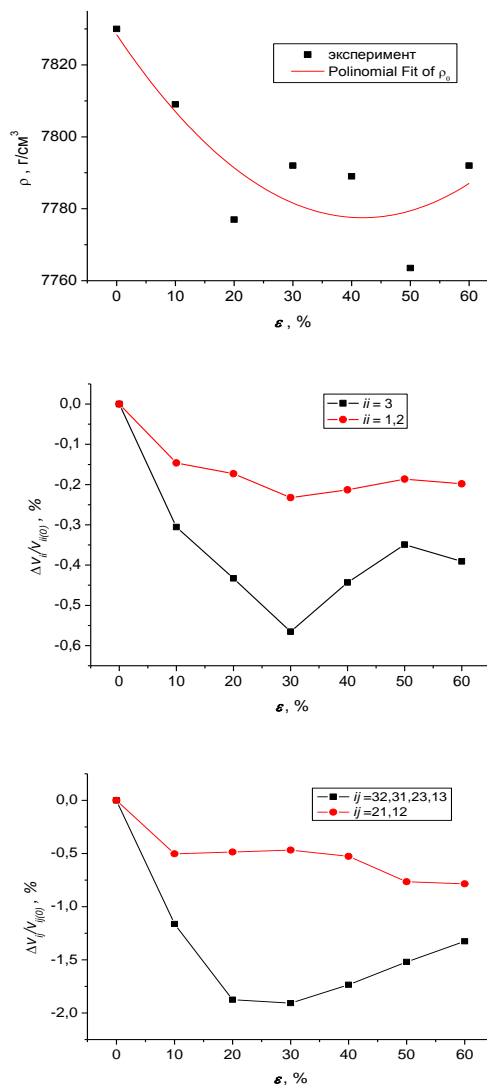


Рис. 2. Зависимости от степени деформации ( $\varepsilon$ ) образцов из стали 15Х2НМФА плотности ( $\rho$ ) и изменений продольной ( $v_{ii}$ ) и поперечной ( $v_{ij}$ ) скоростей УЗ вдоль и поперек направления ОС (направление 3) по отношению к своим величинам в недеформированном состоянии

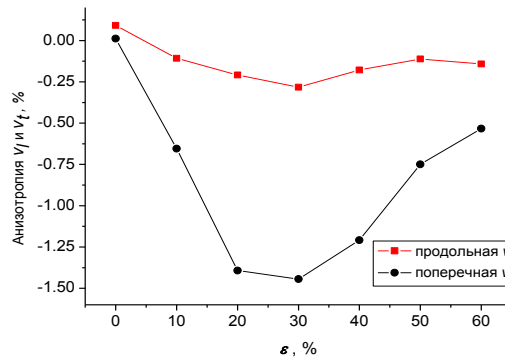


Рис. 3. Зависимость от степени деформации ( $\varepsilon$ ) анизотропии усредненных продольной ( $v_{33} - \langle v_{11,22} \rangle / \langle v_{ii} \rangle$ ) и поперечной  $2(v_{l \min} - v_{l \max}) / (v_{l \min} + v_{l \max})$  скоростей УЗ в образцах из стали 15Х2НМФА

На рис. 4 также приведены средние значения от этих напряжений. При расчетах использованы измеренные значения  $\rho = 7,830 \text{ г/см}^3$  и  $\mu = 83,889 \text{ ГПа}$ , а также коэффициент Мурнагана для стали  $n = -643,5 \text{ ГПа}$  [8].

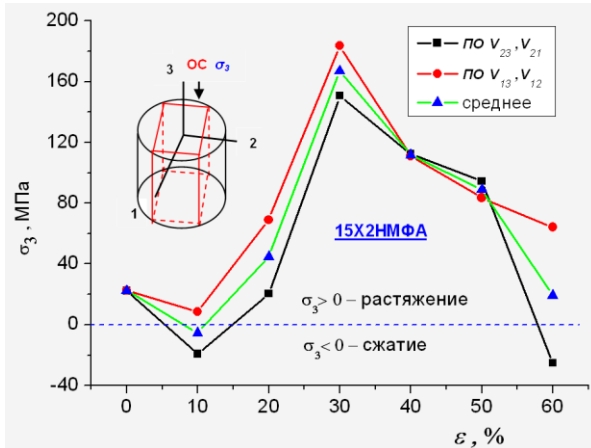


Рис. 4. Зависимость ОМН ( $\sigma_3$ ) от степени деформации ( $\varepsilon$ ) в стали 15X2HMΦA. Расчет выполнен по поперечным скоростям УЗ в направлении, перпендикулярном ОС, с учетом текстурного вклада. Вставка: схематический вид образца, использованного в расчетах скорости УЗ  $v_{ij}$

Видно, что одноосное сжатие исследованных образцов приводит к возникновению в их объеме растягивающих остаточных напряжений, которые с увеличением степени деформации возрастают, при  $\varepsilon = 30\%$  достигают максимального значения, а при  $\varepsilon > 30\%$  снижаются. Наблюдаемая экстремальная зависимость  $\sigma_3(\varepsilon)$ , по мнению авторов, обусловлена

частичной релаксацией ОМН из-за изменения механизма деформирования металла при больших степенях деформации.

Заметим, что при  $\varepsilon = 60\%$  наблюдается значительный разброс значений  $\sigma_3$ , связанный с наблюдаемой экспериментально пространственной неоднородностью ОМН у этих образцов. Выборочные рентгеновские исследования тех же образцов после ОС показали, что в их приповерхностных слоях возникают ОМН сжатия.

На рис. 5 приведены характерные полюсные фигуры [100] и [111] для исходного и продеформированных при ОС образцов из стали 15X2HMΦA с плоскости деформации для  $\varepsilon = 0, 10, 30$  и  $50\%$ . В подстрочных надписях кроме  $\varepsilon$  указаны значения текстурных коэффициентов  $W_{4i0}$  и относительной интенсивности дифракционных линий  $\Delta I_{[ijk]} = I_{[ijk]max} - I_{[ijk]min}$ . При расчетах  $W_{4i0}$  использованы измеренные значения:  $\rho = 7,830 \text{ г/см}^3$ ;  $\mu = 83,889 \text{ ГПа}$ ;  $K = 168,585 \text{ ГПа}$  и  $C_{11} = 232,2 \text{ ГПа}$ ;  $C_{12} = 135,6 \text{ ГПа}$ ;  $C_{44} = 119,0 \text{ ГПа}$  из [8]. При этом  $C^H = -139,99 \text{ ГПа}$ . Видно, что на первых стадиях деформации в образцах формируется аксиальная текстура, степень текстурированности которой, в отличие от зависимости  $\sigma_3(\varepsilon)$ , мало изменяется при  $\varepsilon \geq 20 \dots 30\%$ . Сказанное подтверждается рис. 6, на котором изображены зависимости  $\Delta I_{[ijk]}(\varepsilon)$  для основных кристаллографических направлений исследованных образцов, полученные из соответствующих полюсных фигур. Этот результат согласуется с данными параллельных рентгеновских исследований, результаты которых будут представлены в другой работе.

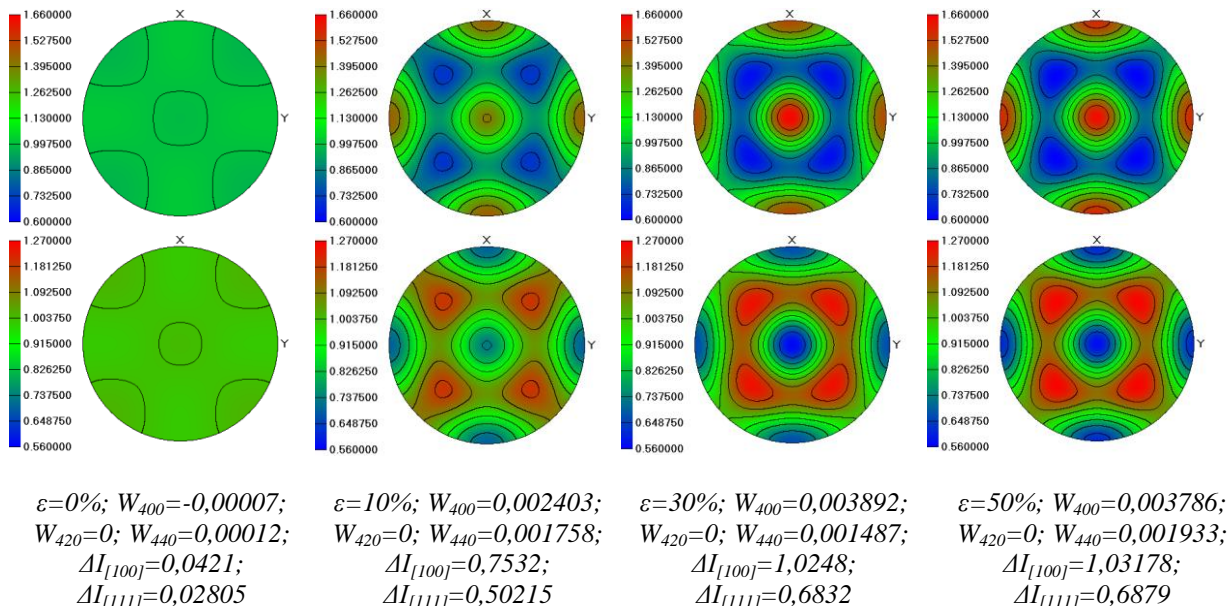


Рис. 5. Полюсные фигуры [100] (верхняя группа) и [111] (нижняя группа) для исходной и продеформированной при ОС стали 15X2HMΦA с плоскости деформации. В подстрочных надписях указаны значения  $\varepsilon$ , коэффициентов  $W_{4i0}$  и относительной интенсивности дифракционных линий  $\Delta I_{[ijk]}$

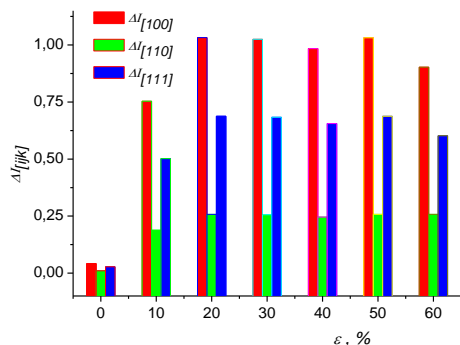


Рис. 6. Относительная интенсивность дифракционных линий  $\Delta I_{[ijk]}$  направлений  $[100]$ ,  $[110]$  и  $[111]$  для стали 15X2HMFA в зависимости от степени деформации  $\varepsilon$  при ОС

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных прецизионных измерений продольной ( $v_l$ ) и поперечной ( $v_t$ ) скоростей УЗ в ортогональных направлениях, а также плотности ( $\rho$ ) в образцах из стали 15X2HMFA, продеформированных путем ОС на  $\varepsilon = 0 \dots 60\%$ , обнаружены аномальные изменения  $v_l$ ,  $v_t$  и их анизотропии от  $\varepsilon$ . На основе полученных данных и использованной теоретической базы рассчитаны ОМН для разных степеней деформации с учетом текстурного вклада, а также определены коэффициенты распределения ориентации кристаллитов (текстурные коэффициенты  $W_{410}$ ) и построены полюсные фигуры, по которым определена относительная интенсивность дифракционных линий ( $\Delta I_{[ijk]}$ ) для главных кристаллографических направлений. Показано, что ОМН в объеме образцов после ОС являются растягивающими, а их зависимость от степени деформации проходит через максимум в районе  $\varepsilon = 30\%$ . Установлено, что при использованных начальных степенях деформации ( $\varepsilon = 10 \dots 20\%$ ) в образцах формируется аксиальная текстура, которая при дальнейшем деформировании изменяется несущественно. Экстремальное поведение  $\sigma(\varepsilon)$  объясняется частичной релаксацией ОМН при  $\varepsilon > 30\%$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. Тейлор. *Рентгеновская металлография*. М.: «Металлургия», 1965, 387 с.
2. Д.М. Васильев. О микронапряжениях, возникающих в поликристаллических образцах при пластическом деформировании // *ЖТФ*. 1958, т. 28, №11, с. 25-27.
3. Д.М. Васильев. О природе эффекта Баушингера // *Некоторые проблемы прочности твердого тела*. М.: Изд-во АН СССР, 1959, с. 37-48.
4. Ю.В. Бойко, И.В. Навроцкий, В.В. Куколь. Зависимость ориентированных микронапряжений в пластически деформированной стали от направления внешней нагрузки // *ФММ*. 1984, т. 57, №5, с. 77-80.
5. Б.З. Марголин, В.А. Швецова, А.Я. Варовин. Предварительное сжатие материалов как фактор

смены механизма хрупкого разрушения ОЦК-металлов // *Проблемы прочности*. 1996, №4, с. 5-18.

6. А.Н. Гузь, Ф.А. Махорт. *Введение в акустоупругость*. Киев: «Наукова думка», 1977, 151 с.

7. В.М. Бобренко, М.С. Вангели, А.Н. Куценко. *Акустические методы контроля напряженного состояния материала машин*. Кишинев: «Штиница», 1981, 148 с.

8. D.R. Allen, C.M. Sayers. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique // *Ultrasonics*. 1984, v. 22, N 4, p.179-188.

9. Ф.А. Махорт, О.И. Гуца. Основы теории определения трехосных напряжений ультразвуковым методом // *Прикладная механика*. 1987, т. 23, №1, с.18-23.

10. A.V. Clark, H. Fukioka, D.V. Nitrakovic, J.C. Noulder. Ultrasonic characterization of residual stress and texture in casts steel railroad wheels // *Rev. Progr. Quant Nondestruct. Eval. V. 6B: 2rd half Proc. 13th Annu. Rev. Progr. Quant. Nondestruct. Eval. Zajolla: Calif. Aug. 3-8, 1986. New York, London*. 1987, p.1567-1575.

11. Н.Е. Никитина. *Акустоупругость. Опыт практического применения*. Н. Новгород: «ТАЛАМ», 2005, 208 с.

12. О.И. Запорожец, Л.В. Тихонов. Ультразвуковые исследования распределения остаточных микронапряжений в хроме после термоциклической обработки // *Металлофизика. Письма в редакцию*. 1985, т. 7, №5, с. 119-120.

13. О.И. Запорожец, Л.В. Тихонов. Новый ультразвуковой метод неразрушающего контроля чистоты и напряженного состояния металлов и сплавов // *Высокочистые вещества*. 1994, №3, с.100-103.

14. А. с. 1126866 М. Кл. 01 29/00. *Ультразвуковой способ контроля микронапряжений в изделиях* / В.Н. Гряднев, О.И. Запорожец, Л.В. Тихонов. Опубл. в БИ, 1984, №44.

15. C.M. Sayers, G.P. Clarke. Effect of non-alignment of specimen and texture axes on the measurement of stress using the ultrasonic SH wave technique // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1986, v. 19, p. 1547-1553.

16. C.M. Sayers, G.G. Proudfoot. Angular dependence of the ultrasonic SH wave velocity in rolled metal sheets // *J. Mech. Phys. Solids*. 1986, v. 36, N 6, p. 579-592.

17. C.M. Sayers. Ultrasonic Velocities in Anisotropic Polycrystalline Agregates // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1982, v. 15, p. 2157-2167.

18. J. Lewandowski. Evaluation of the Texture of Polycrystalline Agregate from Ultrasonic Measurements // *Ultrasonics*. 1986, v. 24, N 2, p.73-80.

19. R.B. Thompson, J.F. Smith, S.S. Lee, G.C. Jonson. A Comparison of Ultrasonic and X-Ray Determinations of Texture in Thin Cu and Al Plates // *Met. Trans. A*. 1989, v. 20A, p. 2431-2439.

20. M. Hirao, N. Hara. Ultrasonic Pole Figure for the Texture of Aluminium Alloy // *Appl. Phys. Lett.* 1987, v. 50, N 20, p.1411-1412.

21. О.И. Запорожец, Н.А. Дордиенко, А.В. Бочко, Г.С. Доронин, Н.Н. Кузин, И.А. Петруша. Исследование упругих модулей ПСТМ типа DBN, ПТНБ и гексанита-Р импульсным УЗ-методом // *Перспективные материалы. Труды I Международной конференции «Functional Nanomaterials and High-Purity Substances»*. М.: «Интерконтакт Наука», 2008, №6, в. 1, с. 152-158.

22. В.М. Ажажа, Н.А. Дордиенко, О.И. Запорожец, О.П. Карасевская, К.В. Ковтун,

В.А. Михайловский, С.П. Стеценко, А.П. Шпак. Ультразвуковая диагностика эволюции текстуры при прокатке сплава Zr1Nb // *Труды XIX Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (XIX-ICRRP)*, 06–11 сентября 2010 г., Алушта, Крым, 2010, с. 145-146.

*Статья поступила в редакцию 16.06.2014 г.*

## **УЛЬТРАЗВУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ МАКРОНАПРУЖЕНЬ У СТАЛІ 15X2NMFA ПІСЛЯ ОДНОВІСНОГО СТИСКАННЯ**

*О.І. Запорожець, С.О. Котречко, М.О. Дордієнко, В.А. Михайловський, О.В. Зацарна*

Виконано прецизійні вимірювання об'ємних швидкостей ультразвуку (УЗ) в ортогональних напрямках зразків зі сталі 15X2NMFA після одновісного стискання (ОС) на ступінь деформації  $\varepsilon = 0 \dots 60\%$ . На основі отриманих даних та використаної теоретичної бази, розраховані залишкові макронапруження (ЗМН) для різних  $\varepsilon$  з урахуванням текстурного внеску. Визначено коефіцієнти розподілу орієнтацій кристалітів (текстурні коефіцієнти  $W_{4i0}$ ) та побудовано полюсні фігури, за якими визначена відносна інтенсивність дифракційних ліній ( $\Delta I_{[ijk]}$ ) для головних кристалографічних напрямків. Виявлено особливості в залежностях досліджених величин від  $\varepsilon$  і надано пояснення спостережуваним ефектам.

## **ULTRASONIC INVESTIGATION OF MACRORESIDUAL STRESSES IN 15Cr2NMFA STEEL AFTER UNIAXIAL COMPRESSION**

*O.I. Zaporozhets, S.A. Kotrechko, N.A. Dordienko, V.A. Mykhailovsky, A.V. Zatsarnaya*

Precise measurements of bulk-wave ultrasonic velocity in orthogonal directions in samples of the 15Cr2NMFA steel after uniaxial compression (UC) on degree of deformation  $\varepsilon = 0 \dots 60\%$  were made. Based on the obtained data and theoretical computations the residual macrostresses (RMS) for different degrees of deformation with taking account of the texture contribution were calculated. The orientation distribution coefficients of crystallites (texture coefficients  $W_{4i0}$ ) were determined and pole figures were constructed, by which was defined the relative intensity of diffraction lines ( $\Delta I_{[ijk]}$ ) for the main crystallographic directions. The peculiarities in the dependencies of the researched quantities on  $\varepsilon$  were found and explanations to the observed effects were given.