

05:08;12

## Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали

© И.М. Полетика, Н.М. Егорова, О.А. Куликова, Л.Б. Зуев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 19 ноября 1999 г. В окончательной редакции 24 апреля 2000 г.)

Обнаружена неоднородность распределения физических и механических свойств (скорости ультразвука, твердости и ударной вязкости) в горячекатаной листовой стали 09Г2С, связанная с неравномерным протеканием процессов деформации и рекристаллизации в различных участках листа. Эффект выражен сильнее при пониженных температурах конца прокатки. Определены корреляционные уравнения, связывающие указанные свойства, и обосновано применение измерений скорости ультразвука для оценки механических характеристик.

### Введение

Известно, что скорость распространения ультразвука (СУЗ) в металлах связана с их структурой и свойствами [1–3] и с этой точки зрения является перспективной в качестве информативного параметра в неразрушающем методе контроля, например, сталей и сплавов в состоянии поставки [4–6]. Одним из таких материалов является стальной листовой прокат. Большие размеры готового листа нередко не позволяют добиться однородности свойств по всей площади, что в ряде случаев недопустимо. Поэтому производителю листового металла необходим способ быстрого и точного выходного, а потребителю соответственно — входного контроля свойств. Ответственное назначение продукции дополнительно обостряет проблему выбора надежного информативного параметра для неразрушающего определения прочностных характеристик сталей и повышения точности такой оценки путем пересчета измеряемой величины в искомую. Задачей настоящей работы является проверка применимости СУЗ в качестве упомянутого выше информативного фактора.

### Методика исследования

Исследования проводились на распространенной и широко используемой в настоящее время низколегированной горячекатаной листовой стали 09Г2С (0.09%С, 1.32%Mn, 0.64%Si, 0.02%P, 0.027%S, 0.02%Cr, 0.02%Ni, 0.05%Cu). Ее структурное состояние и механические свойства искусственно варьировались выбором температуры конца прокатки на толстолистовом стане (допустимые значения этого параметра в ходе технологического процесса обычно фиксируются в узких пределах, и его изменение задавалось специально). Образцы изготавливались из пластин размером  $800 \times 150 \times 10$  мм, предварительно отрезанных от листов толщиной 10 мм, для которых температура конца прокатки  $T_{\text{н}}$  составляла 830, 880, и 950°C. Ударная вязкость  $K_V$  определялась на образцах с V-образным надрезом по ГОСТ 9454-78 при температуре  $-25^\circ\text{C}$ , входящей в интервал температур

вязко-хрупкого перехода для этой стали. Для этих целей из пластины вырезались 50 образцов (длинная ось в направлении прокатки). На каждом из образцов определяли также твердость по Виккерсу  $HV$ , анализировали микроструктуру и измеряли скорость ультразвука  $V_R$  ( $\sim 30$  измерений на образце) прибором ИСП-12, разработанным в [3]. Прибор работает на основе принципа автоциркуляции ультразвуковых импульсов и генерирует пакеты поверхностных акустических волн (волн Рэлея) с несущей частотой  $\nu = 1$  МГц. Глубина проникновения таких волн в металл составляет [1]  $\lambda = V_R/\nu \approx 2.5$  мм. Точность определения скорости ультразвука автоциркуляционным прибором, согласно ее многократным измерениям, проведенным в [3], составляет 0.003–0.005%. Такая высокая точность обеспечивается стабильностью контакта пьезопреобразователей с образцом и достигается нанесением слоя контактной жидкости и использованием магнитных прижимов. В нашем случае точность повышается также за счет большой статистики измерений.

Была предпринята попытка уточнить корреляцию ударной вязкости и твердости со СУЗ, на что ранее было обращено внимание в работах [4–6]. Перспективы такого исследования связаны с разработкой методики оценки одного из важнейших показателей прочности — ударной вязкости акустическим методом без изготовления образцов и их разрушения.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследование СУЗ и механических свойств образцов из листов, прокатанных по режимам с разной  $T_{\text{н}}$ , показало, что в случае  $T_{\text{н}} = 830^\circ\text{C}$  свойства листовой стали неоднородны и в пределах одной пластины обнаруживается широкий спектр значений твердости, ударной вязкости и СУЗ. Эти величины соответственно меняются в пределах  $1880 \leq HV \leq 2160$  МПа,  $0.4 \leq K_V \leq 3.3$  МДж/м<sup>2</sup> и  $2877 \leq V_R \leq 2886$  м/с. При этом во всем проанализированном диапазоне значений твердости и в широком интервале значений ударной вязкости отмечается линейная

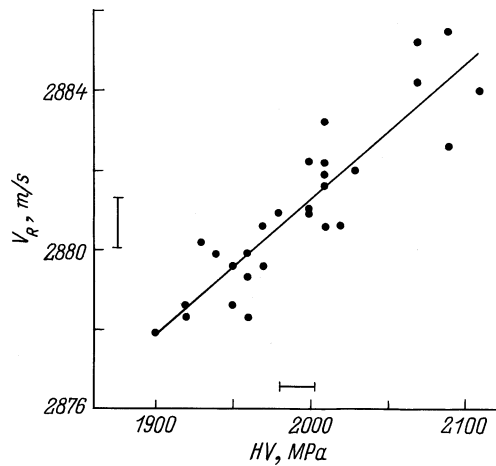


Рис. 1. Корреляция между скоростью ультразвука в стали 09Г2С и ее твердостью при  $T_{fit} = 830^\circ\text{C}$ .

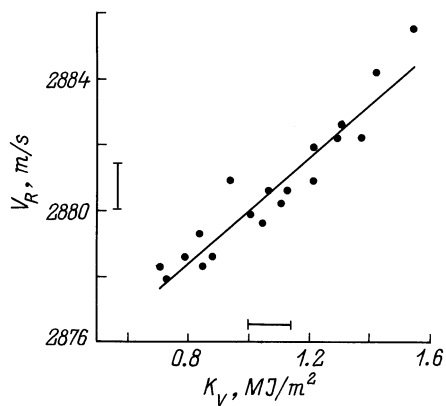


Рис. 2. Корреляция между скоростью ультразвука и ударной вязкостью.

корреляция между  $V_R$  и  $HV$  и между  $V_R$  и  $K_V$  (рис. 1, 2). Соответствующие корреляционные уравнения, полученные методом наименьших квадратов [7], имеют вид

$$V_R = 3.4 \cdot 10^{-2} HV + 2813, \quad V_R = 8.0 K_V + 2871, \quad (1), (2)$$

а коэффициенты корреляции достаточно высоки и составляют  $\chi_1 = 0.90$  для (1) и  $\chi_2 = 0.94$  для (2). В свою очередь величины ударной вязкости  $K_V$  и твердости  $HV$  также линейно коррелированы друг с другом (рис. 3), причем

$$K_V = 3.8 \cdot 10^{-3} HV - 6.6 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции  $\chi_3 = 0.66$ .

Естественно предположить, что вариации измеряемых величин связаны с изменениями структуры стали в отдельных зонах листа. Для выяснения причин наблюдаемой неоднородности в распределении значений  $V_R$ ,  $HV$  и  $K_V$  в листе при  $T_{fit} = 830^\circ\text{C}$  была изучена структура стали вблизи поверхностей разрушения образцов. Выяснилось, что участки с высокой ударной вязкостью и высокой твердостью соответствуют начальным стадиям

развития рекристаллизации (рис. 4, а). Отметим, что при  $T_{fit} = 830^\circ\text{C}$  последние стадии деформации протекают уже в феррито-перлитной области. На микрофотографиях в этом случае видны исходные крупные ферритные зерна, вытянутые в направлении прокатки и ограниченные зернами перлита, раскатанными в "строчки". На фоне этой структуры в областях, прилегающих к границам зерен, развивается рекристаллизация. Исходные зерна феррита дробятся и заполняются новыми мелкими кристаллитами (рис. 4, а). Для участков с высокими значениями  $K_V$  и  $HV$  средний размер ферритного зерна, определенный методом секущей, составил  $\sim 5 \mu\text{m}$ , а в отдельных участках —  $\sim 2.5 \mu\text{m}$ . Низкие значения ударной вязкости и твердости характерны для участков с более развитой рекристаллизованной структурой (рис. 4, б). "Строчечного" расположения фаз здесь не наблюдается. Средний размер ферритного зерна достигает  $\sim 8 \mu\text{m}$ .

Такое различие в структуре участков связано с неравномерным протеканием пластической деформации в различных объемах металла, неоднородным развитием компенсирующих друг друга процессов упрочнения и разупрочнения (возврат, полигонизация, рекристаллизация) в области низких температур прокатки. Согласно [8], для каждой степени деформации существует пороговая температура прокатки, начиная с которой происходят снятие деформационного наклепа и формирование новых рекристаллизованных зерен.

Для определения размеров областей такой неоднородности проведено измерение  $V_R$  и  $HV$  в исходной пластине с шагом, соответствующим размеру ультразвукового щупа ( $\sim 30 \text{ mm}$ ) прибора ИСП-12. Оказалось, что области высоких и низких значений  $V_R$  и  $HV$  чередуются с периодичностью  $120 \dots 160 \text{ mm}$  при измерении СУЗ в направлении прокатки. При измерении СУЗ в поперечном направлении эффект выражен слабее и проявляется главным образом в сравнительно небольших колебаниях СУЗ относительно средней величины.

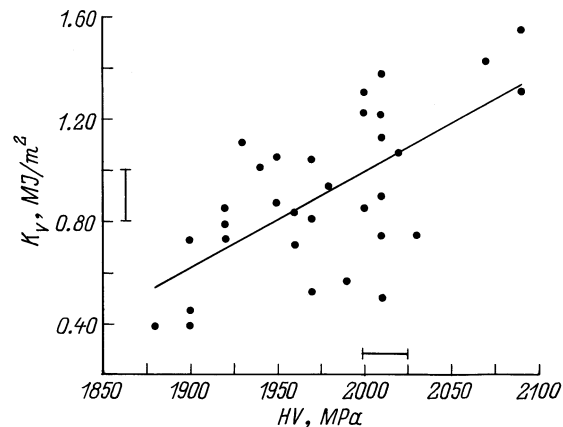
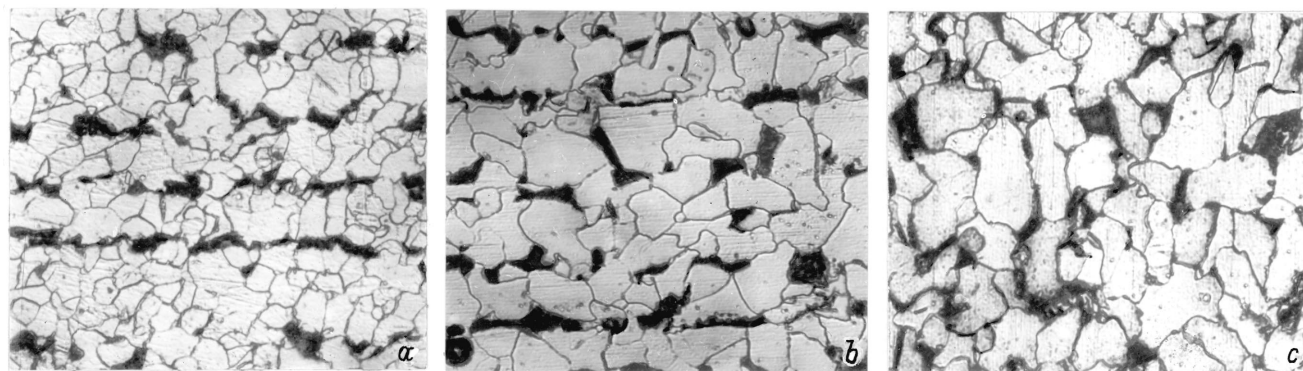
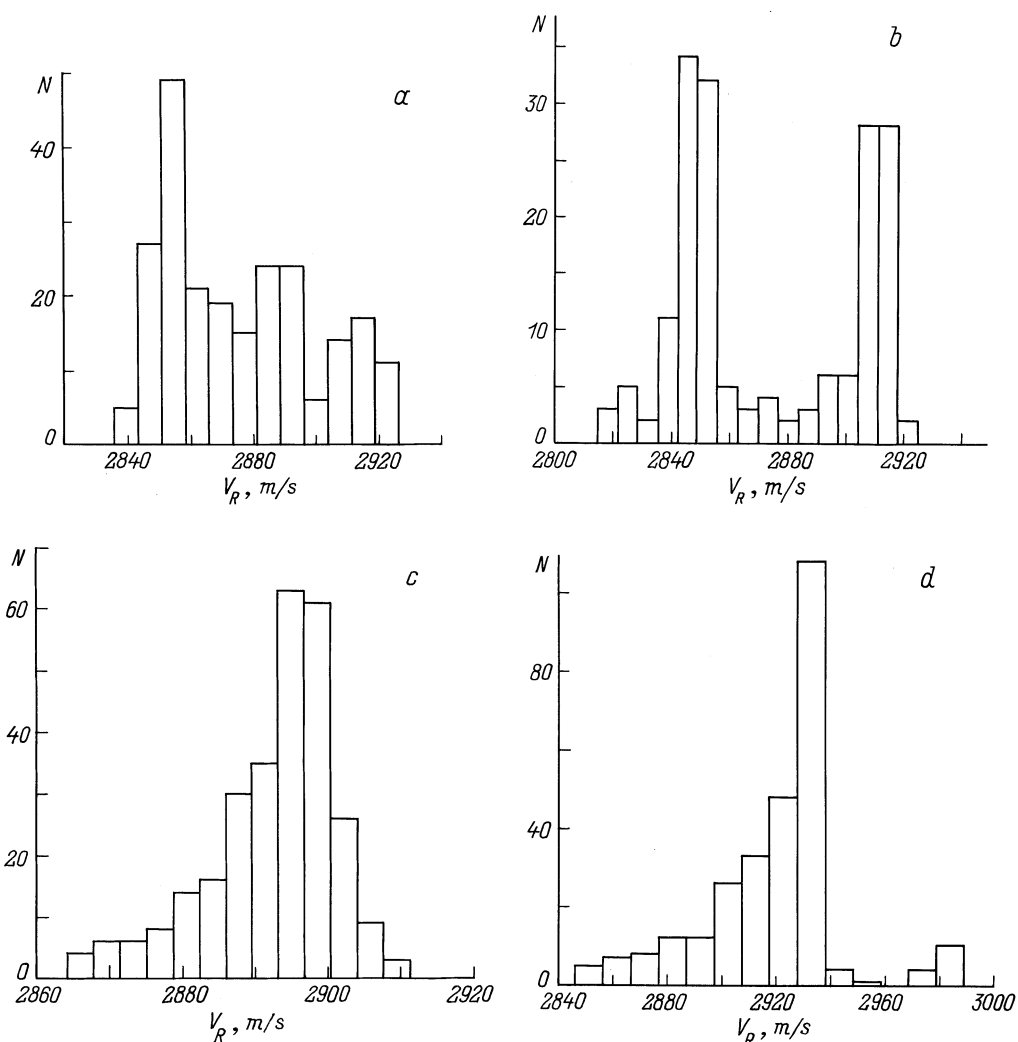


Рис. 3. Корреляция между ударной вязкостью и твердостью стали 09Г2С.



**Рис. 4.** Микроструктура стали 09Г2С при  $T_{\text{н}} = 830^{\circ}\text{C}$ . *a* — участок с высоким значением  $K_V$ ,  $\times 800$ ; *b* — участок с низким значением  $K_V$ ,  $\times 500$ ; *c* —  $T_{\text{н}} = 950^{\circ}\text{C}$ ,  $\times 500$ .



**Рис. 5.** Распределения значений СУЗ в стальном листе с разным значением  $T_{\text{н}}$ . Измерения вдоль направления прокатки: *a* — 830, *b* — 880, *c* —  $950^{\circ}\text{C}$ ; измерение поперек направления прокатки: *d* —  $830^{\circ}\text{C}$ .

Увеличение  $T_{\text{н}}$  стимулирует динамическую и статическую рекристаллизацию деформированной стали, что приводит к образованию почти равноосной зерновой структуры (рис. 4, *c*). Дополнительное уравнивание

структуры и снятие деформационного наклепа происходят в процессе фазовой перекристаллизации при охлаждении. Все это способствует снижению структурной неоднородности. Разброс значений  $V_R$ ,  $HV$  и  $K_V$  в листе со-

крашается, и корреляционные соотношения нарушаются. При  $T_{\text{н}} = 950^\circ\text{C}$  значения указанных величин меняются в более узких по сравнению с приведенными выше пределах:  $2879 \leq V_R \leq 2883 \text{ m/s}$ ,  $1920 \leq HV \leq 1990 \text{ MPa}$ ,  $0.2 \leq K_V \leq 0.5 \text{ MJ/m}^2$ .

Характер изменения величин  $K_V$  и  $HV$  при  $T_{\text{н}} = 830^\circ\text{C}$  согласуется с существующими в литературе теоретическими и экспериментальными данными о зависимости механических свойств от размера зерна [8]. В изменение скорости звука может давать вклад сразу несколько факторов: анизотропия свойств деформированной стали, в частности модулей упругости; деформация ферритных и перлитных зерен при прокатке; неоднородное распределение примесей и неодинаковая плотность в различных участках металла.

Большой интерес представляет распределение значений СУЗ, встречающихся в исследованных пробах. Для примера на рис. 5 показаны гистограммы  $V_R$  для стальных листов с разной  $T_{\text{н}}$ . При росте  $T_{\text{н}}$  распределение становится сначала бимодальным, а затем и унимодальным, что свидетельствует о росте однородности свойств. Обращает на себя внимание более простая форма распределения для случая измерения СУЗ поперек направления прокатки (рис. 5, *d*), что указывает на меньшую вариацию свойств в этом направлении. Крутой спад при больших  $V_R$  обусловлен приближением к максимально возможному значению СУЗ, характерному для бездефектного материала.

## Заключение

Линейный характер корреляционных зависимостей (1)–(3) качественно можно объяснить функциональной связью всех трех величин с упругими свойствами металлов. Действительно [1],  $V_R \sim (G/\rho)^{1/2}$ , где  $G$  — модуль сдвига,  $\rho$  — плотность. В то же время характеристики деформационного упрочнения металлов и сплавов связаны с модулем сдвига [8–11]. Более точная количественная связь между исследованными величинами пока не установлена.

Заметим, что в принципе для оценки ударной вязкости неразрушающим методом можно использовать корреляционное уравнение (3), связывающее эту величину с твердостью, но из-за малого коэффициента корреляции в этом случае ( $\chi_3 = 0.66$ ) подобная оценка оказывается ненадежной и уступает по точности получаемой акустическим методом по уравнению (2).

## Список литературы

- [1] Крауткремер И., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов, М.: Металлургия, 1991.
- [2] Рохлин Л.Л. Акустические свойства легких сплавов. М.: Наука, 1974.
- [3] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск.: Наука, 1996.

- [4] Полетика И.М., Пахилова Н.М., Зуев Л.Б., Куликова О.А. // ФизХОМ. 1997. № 3. С. 118–120.
- [5] Полетика И.М., Лоскутов Д.Р., Пахилова Н.М. и др. // Сталь. 1998. № 3. С. 63–65.
- [6] Zuev L.B., Poletika I.M., Semukhin B.S. et al. // Metall. 1999. Bd. 53. N. 9. S. 324–327.
- [7] Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: ГИФМЛ, 1961.
- [8] Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977.
- [9] Токуока Т., Ивашимизу Ю. // Int. J. Solids Structures. 1968. Vol. 4. P. 383–389.
- [10] Бокштейн С.З. Диффузия и структура металлов. М.: Металлургия, 1973.
- [11] Брайент К.Л., Бенерджи С.К. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1988.