

ИЗУЧЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ТВЕРДОСТЬЮ И СКОРОСТЬЮ ЗВУКА В НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

И.М. Полетика, Н.М. Егорова, В.В. Ткаченко, Л.Б. Зуев

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021, г. Томск, пр. Академический 2/1,
E-mail: ispms@ispms.tomsk.su*

В работе обнаружены линейные корреляционные зависимости между скоростью звука и твердостью горячекатанной низколегированной стали 09Г2С в исходном состоянии и после закалки из интервала температур, включающего точку фазовой перекристаллизации. Скорость звука измеряли прибором, работающем на основе автоциркуляции ультразвуковых импульсов.

Испытания на твердость широко применяются для оценки механических свойств металлов и сплавов. Поскольку твердость отражает способность поверхностного слоя сопротивляться упругой и пластической деформации, существуют уравнения, связывающие эту величину с другими механическими характеристиками [1]. Представляет интерес изучение корреляционной связи твердости с физическими свойствами, в частности, скоростью распространения ультразвукового излучения. В работах В.В. Муравьева [2-4] обнаружены линейные зависимости между твердостью и скоростью звука в алюминиево-литиевых сплавах, в сварном шве стали 10ХМФ, в закаленной стали ШХ15СГ, в рельсовой стали.

В настоящей работе исследовалась связь между твердостью и скоростью звука в низколегированной стали. Измеряли твердость по Виккерсу HV. Структурное состояние и размер зерна оценивали металлографически. Скорость ультразвука V_R (волны Релея, глубина проникновения 2,5 мм) измеряли прибором ИСП-12, описанным в [2] и работающим на основе автоциркуляции ультразвуковых импульсов. Точность измерений 0,005-0,01%. Объектом исследования служила сталь 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) с температурой конца прокатки 830⁰С, произведенная на Кузнецком металлургическом комбинате.

Эксперимент проводился в два этапа. Первоначально из стальной пластины в состоянии поставки вырезали 50 образцов размером 10×10×45 мм (длинная ось в направлении прокатки), соответствующим размеру ультразвукового датчика, и определяли на них значения HV и V_R (20-30 измерений на образце). Затем, для изменения структуры металла осуществляли термические обработки в виде закалки из интервала температур 800-980⁰С, содержащего точку фазовой перекристаллизации, и проводили повторные измерения.

Исследование показало, что величины V_R и HV в исходной стали меняются в широких пределах ($1880 \leq HV \leq 2160$) МПа и ($2877 \leq V_R \leq 2886$) м/с. При этом между ними наблюдается линейная корреляция (рис.1). Соответствующее корреляционное уравнение имеет вид:

$$V_R = 3,4 \times 10^{-2} HV + 2813. \quad (1)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,90.

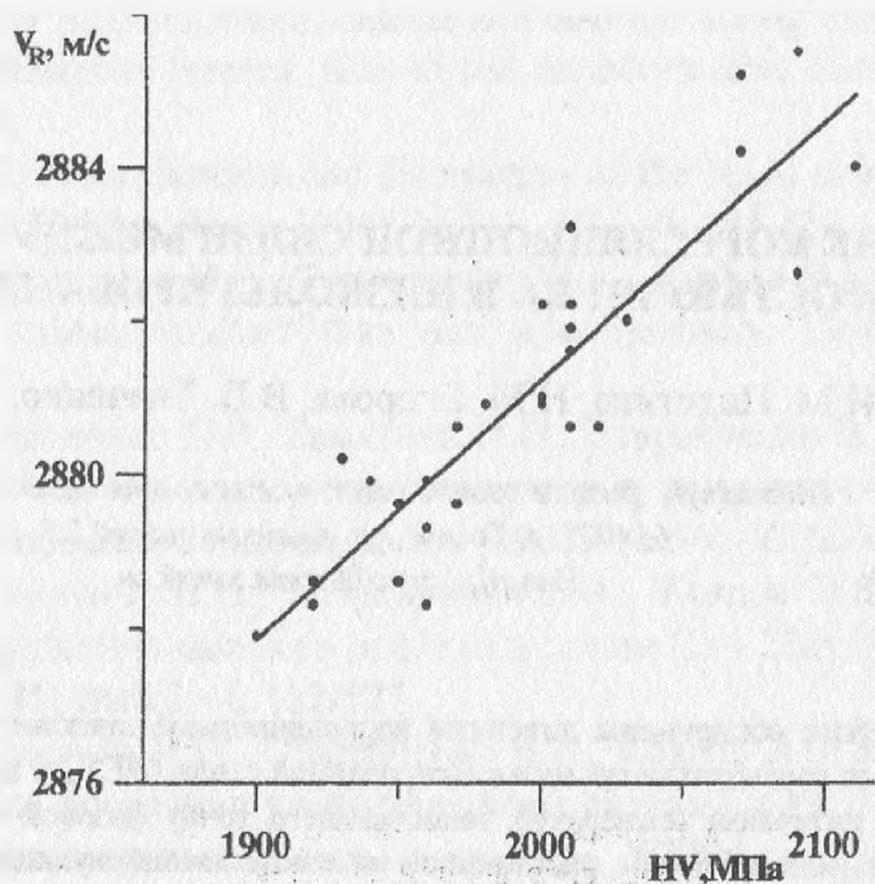


Рис. 1. Корреляция между скоростью ультразвука и твердостью стали 09Г2С в исходном состоянии.

Для выяснения причин колебаний V_R и HV была изучена структура отдельных образцов. Оказалось, что наблюдаемая неоднородность свойств обусловлена структурной неоднородностью. Участки с высокой твердостью и скоростью звука соответствуют начальным стадиям рекристаллизации. На микрофотографиях видны исходные, вытянутые в направлении прокатки зерна перлита (последние стадии деформации протекают в феррито-перлитной области), пространство между которыми заполнено мелкими ферритными зернами (рис. 2, а). Средний размер ферритного зерна составляет 3-5 мкм.

Низкие значения твердости характерны для участков с развитой рекристаллизованной структурой (рис. 2, б). Размер ферритного зерна 8-10 мкм. "Строчечного" расположения фаз не наблюдается. Различие в структуре участков связано с неравномерным протеканием процессов упрочнения и разупрочнения в металле при горячей пластической деформации. Согласно [5], для каждой степени деформации существует пороговая температура прокатки, при которой снимается деформационный наклеп и формируется новая рекристаллизованная структура.

Для определения размеров областей структурной неоднородности провели измерение величин V_R и HV непосредственно в листе стали с шагом, соответствующим размеру ультразвукового щупа прибора ИСП-12. Оказалось, что области высоких и низких значений V_R и HV чередуются между собой с периодичностью 120-160 мм при измерении V_R в направлении прокатки (рис. 3). При измерении в поперечном направлении эффект выражен слабее и проявляется в небольших колебаниях V_R относительно средней величины.

При проведении термических закалок образцов происходит изменение размера зерна, связанное с развитием фазовой перекристаллизации. По данным металлографии, фазовое превращение начинается в областях, прилегающих к границам зерен, а затем охватывает весь объем металла (рис. 2, в). Максимальное уменьшение размера зерна наблюдается при температуре 900°C (до 1-2 мкм). Выше этой температуры размер зерна вновь возрастает.

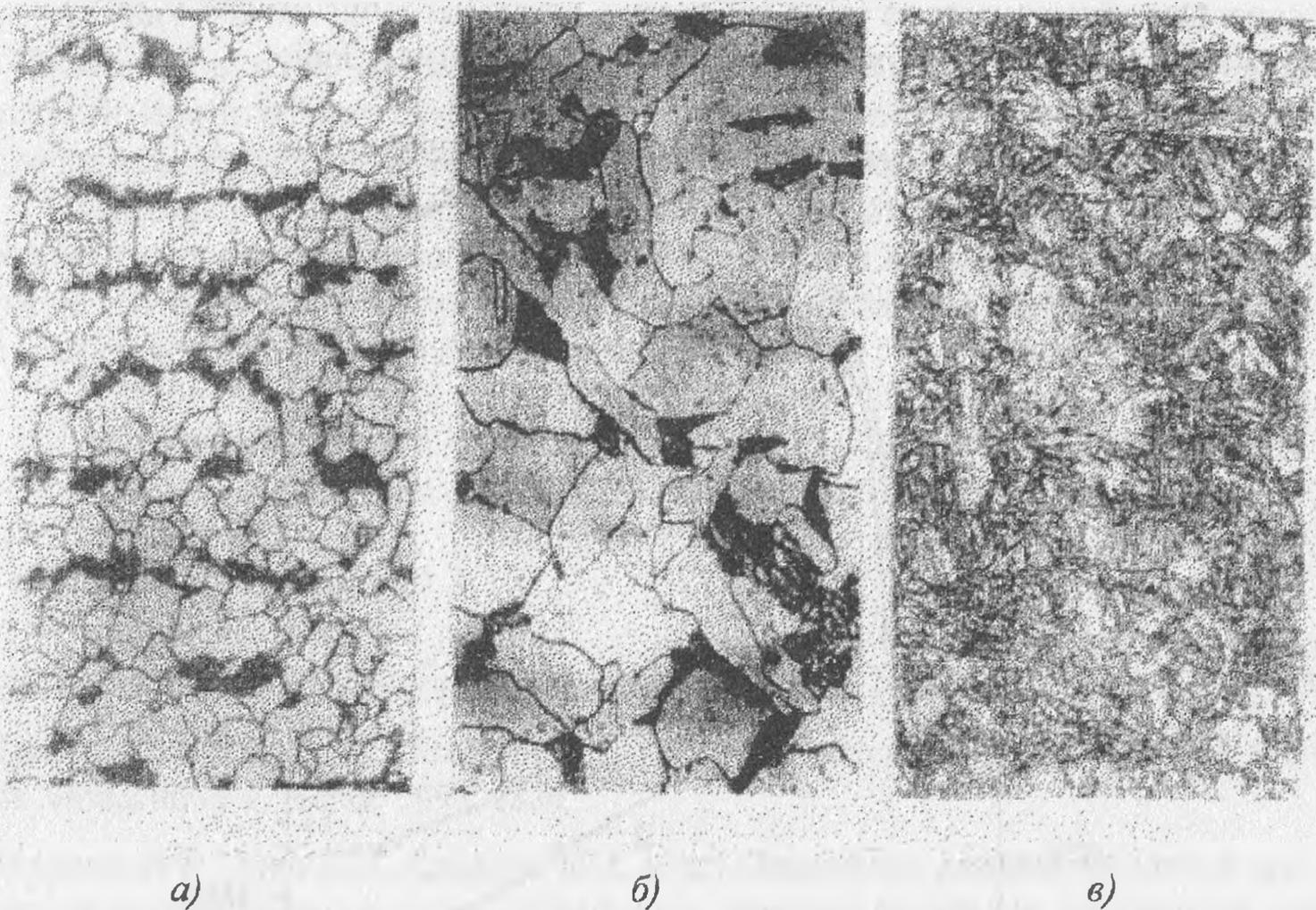


Рис.2. Структура стали в исходном состоянии (а – участок с высокими значениями HV и V_R , $\times 800$; б – участок с низкими значениями HV и V_R , $\times 500$) и после закалки от 890°C (в, $\times 500$).

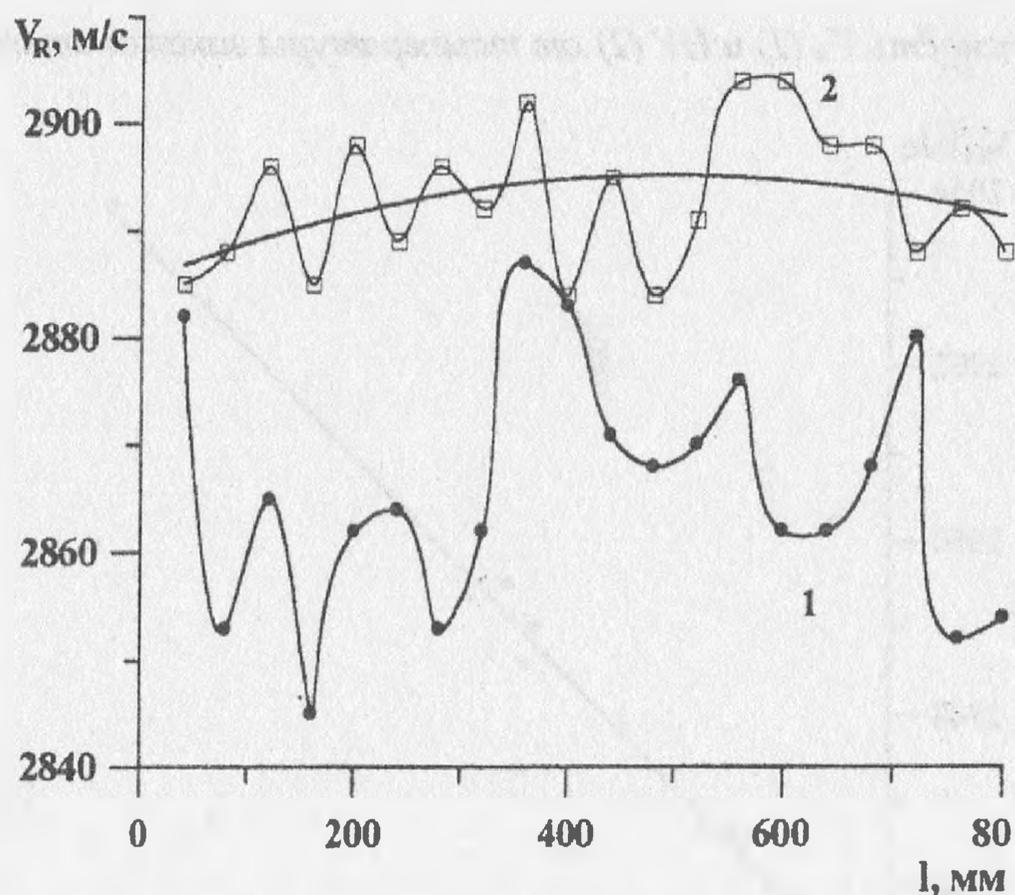


Рис.3. Изменение скорости звука в стальном листе в направлении прокатки (1) и в поперечном направлении (2).

Скорость звука и твердость в рассмотренном интервале температур меняются экстремально (рис.4). Причем, положения максимумов на кривых $V_R(T_{\text{зак}})$ и $HV(T)$ совпадают и соответствуют максимальному измельчению структуры в точке $\alpha \rightarrow \gamma$ -пре-

вращения. Подобие кривых на рис.4 сводится к линейной зависимости $V_R(HV)$ с коэффициентом корреляции 0,99 (рис.5). Уравнение прямой имеет вид:

$$V_R(\text{м/с}) = 10,68 \times 10^{-3} HV(\text{МПа}) + 2913,7 \quad (2)$$

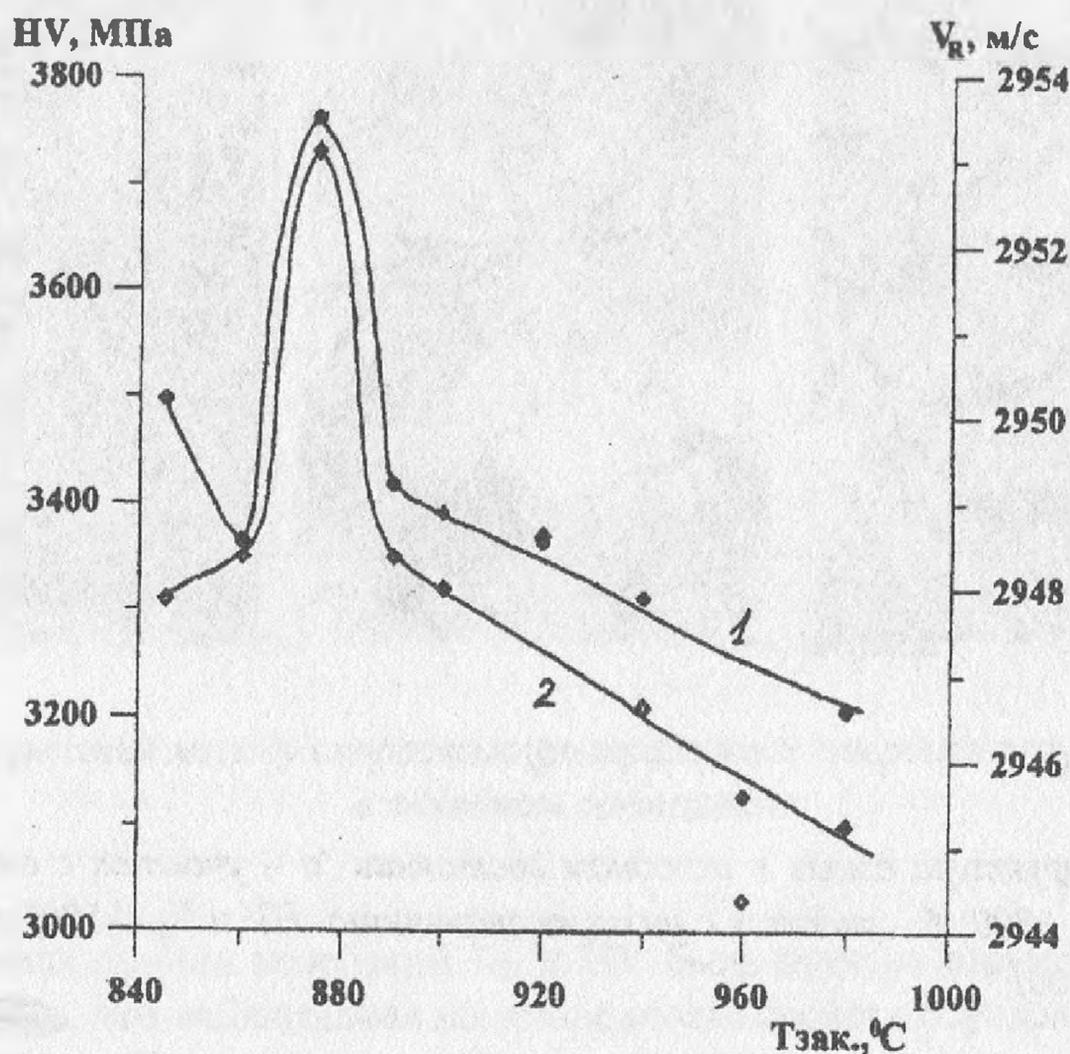


Рис.4. Зависимость V_R (1) и HV (2) от температуры закалки стали 09Г2С.

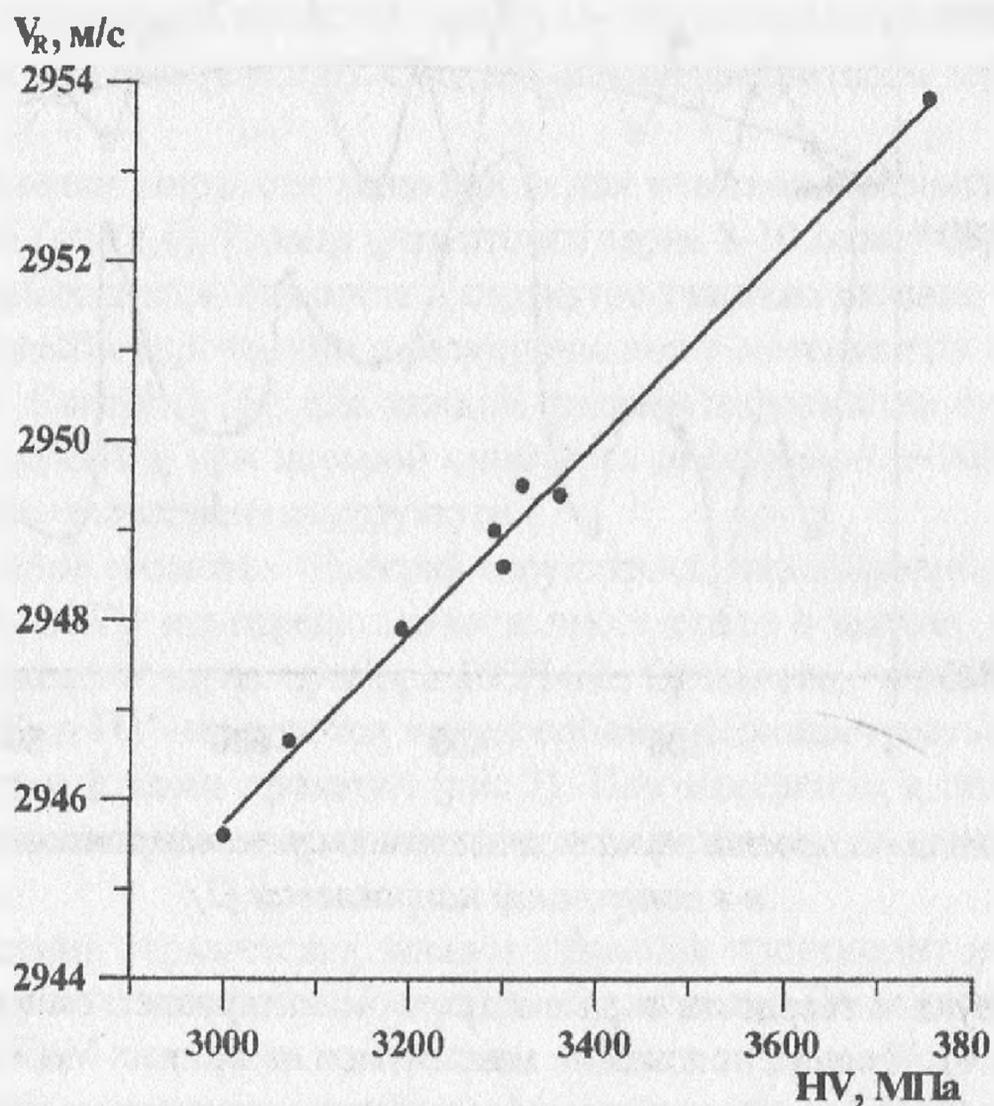


Рис. 5. Корреляция между V_R и HV в стали 09Г2С после закалки.

Линейный характер корреляционной связи между скоростью звука и твердостью качественно можно объяснить функциональной связью этих величин с упругими свойствами металла. Известно [2], что $V_R \sim (G/\rho)^{1/2}$, где G – модуль сдвига, ρ – плотность.

Полученные результаты могут служить основой для разработки метода прогнозирования твердости стального проката, а также других механических свойств, которые через соответствующие формулы связаны с твердостью, без приготовления специальных образцов и проведения их испытаний.

Список литературы

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 350 с.
2. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 183с.
3. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. и др. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом // Проблемы машиностроения и надежности машины: 1994, № 4. С.103-107.
4. Муравьев В.В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки // Дефектоскопия, 1989, № 2. С. 66-68.
5. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977. 430с.