

Шевеля В.В., * **
Купец Б., *
Соколан Ю.С., **

* Жешувская политехника,
г. Жешув, Польша,
** Хмельницкий национальный
университет, г. Хмельницкий, Украина
E-mail: sokolan.julia@gmail.com

СКЛЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И АКУСТИКО - ЭМИССИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЕННОЙ СТАЛИ

УДК 621.891

Исследовано влияние нагрузочно-скоростных режимов скрэтч-тестирования на трибологические показатели и реологические свойства контакта с одновременной регистрацией акустической эмиссии после термического упрочнения стали при электродуговом оплавлении с последующей быстрой кристаллизацией. Показано, что акустико-эмиссионная активность, как показатель релаксационной способности, при определенных скоростях склерометрирования формирует максимумы. Обсуждаются механизмы изменения акустической эмиссии и показателя упругого последствия при сравнении стали в исходном состоянии и после упрочнения.

Ключевые слова: скрэтч - анализ, склерометрия, акустическая эмиссия, износостойкость, коэффициент трения, термическое упрочнение, упругое последствие, оплавление, кристаллизация, дислокации.

Введение

Современная склерометрия (скрэтч - тестирование), традиционно являясь методом определения поверхностной прочности конструкционных материалов, позволяет также оценивать их вязкоупругие свойства и акустико-эмиссионную активность в условиях динамического контактного нагружения. При невысоких контактных нагрузках на сканирующий конический индентор наблюдаемые закономерности изменения трибологических и акустических параметров моделируют локальные процессы контактного взаимодействия поверхностей при обычном трении скольжения.

Ранее в работах [1, 2] этим методом были изучены возможности тепловой обработки металлических поверхностей электродуговой плазмой для повышения сопротивления износу (метод GTAW). Использование концентрированного теплового потока большой мощности позволяет локально оплавливать поверхность, а при эффективном теплоотводе быстрая кристаллизация металла обеспечивает повышение поверхностной прочности. Выяснилось, что для корректной интерпретации данных скрэтч-анализа следует учитывать влияние режимов склерометрирования на регистрируемые характеристики. В противном случае можно получить противоречивые результаты измерений.

Так, в работе [1] скрэтч - тестирование шлифов с поверхности оплавления чугуна показало аномально высокую акустико - эмиссионную активность зоны тепловой обработки, несмотря на низкий коэффициент трения и небольшую глубину внедрения индентора по сравнению с неупрочненным металлом (режимы скрэтч - сканирования: $F_N = 10, 20$ Н; $v_S = 10$ мм/мин).

Интенсивность акустической эмиссии, вызываемой склерометрированием металлической поверхности, рассматривалась как показатель релаксационной (диссипативной) способности металла.

С другой стороны, в работе [2] склерометрический анализ поперечных шлифов зоны теплового упрочнения стали (режим сканирования: $F_N = 40$ Н; $v_S = 4$ мм/мин) показал противоположную картину: зона оплавления с последующей быстрой кристаллизацией, в отличие от исходной структуры, не проявляла акустико-эмиссионную активность.

Последующие исследования [3] влияния традиционной термообработки стали и внешнего трения на показатели скрэтч-тестирования свидетельствовали о том, что интенсивность акустической эмиссии, а также ее локализация по глубине зависят от режима термообработки, нагрузки на индентор и скорости сканирования изучаемой поверхности.

Поэтому была поставлена задача более детально исследовать влияние нагрузочно-скоростных режимов склерометрирования стали, упрочненной электродуговой плазмой, на показатели, характеризующие прочностные, вязкоупругие и релаксационные свойства исследуемой поверхности.

Материал и методика исследований

Исследовалась малоуглеродистая сталь 20 в форме плиток ($200 \times 50 \times 10$ мм), на поверхности которых плазмой электрической дуги осуществлялось зональное оплавление в защитной атмосфере аргона с применением неплавящегося вольфрамового электрода [1, 2].

Сила тока дуги $I = 100$ А, скорость сканирования поверхности электрической дугой $v_e = 200, 400, 600, 800$ мм/мин. Для быстрого отвода теплоты из зоны оплавления и ускорения процесса кристаллизации исследуемая плитка закреплялась в качестве крышки проточного калориметра так, что нижняя ее поверхность омывалась охлаждающим потоком воды.

Трибопрочностные (склерометрические) и акустико-эмиссионные свойства приповерхностных слоев исследовались на скрэтч-тестере RST (Revetest Scratch Tester) фирмы CSM Instruments (Швейцария). При скрэтч-тестировании регистрировались: нормальная нагрузка на алмазный индентор Роквелла (F_N), склерометрическая сила (F_t) коэффициент трения (μ), текущая (P) и остаточная (R) глубины внедрения индентора, скорость перемещения образца относительно индентора (v_S), а также акустическая эмиссия (A).

На рис. 1 показаны направления трасс сканирования зоны оплавления на шлифах, выполненных с поверхности оплавления (шлифы I типа, трасса 1 - 1), и на поперечных шлифах (шлифы II типа, трасса 2 - 2). Здесь же показан принцип изготовления образцов для исследования интенсивности изнашивания упрочненного материала.

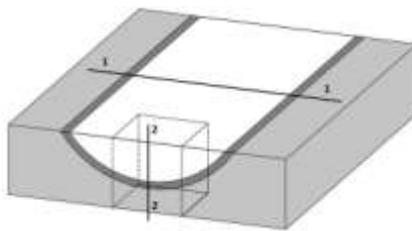


Рис. 1 – Направления трасс скрэтч-сканирования (1 - 1 и 2 - 2) на шлифах зоны оплавления с быстрой кристаллизацией и способ изготовления образцов для триботехнических испытаний

Триботехнические испытания на износостойкость проводились по схеме «палец-диск»: в машине трения образец, вырезанный из зоны оплавления, прижимался с контролируемым усилием к поверхности вращающегося диска, изготовленного из белого чугуна (60HRC). Износостойкость стали оценивалась безразмерной величиной, рассчитываемой по формуле:

$$K = \frac{A L}{m}, \quad (1)$$

где ρ – плотность стали, кг/м³;

A – площадь контакта,

м²; L – путь трения, м;

m – убыль массы образца, кг.

Результаты исследования и их обсуждение

Эффективность поверхностного упрочнения электродуговой плазмой зависит от параметров процесса оплавления – от скорости сканирования электрической дугой, и, в меньшей степени, от силы тока [1, 2].

Так, увеличение скорости сканирования до 600 - 800 мм/мин повышает износостойкость стали после оплавления и быстрой кристаллизации почти на порядок (рис. 2). В то же время микротвердость возросла лишь в 4 раза (в исходном состоянии $HV_{0,05} = 140$, а после упрочнения $HV_{0,05} = 580$). Это свидетельствует о том, что сопротивление износу металлов при трении определяется не только исходной твердостью, но и способностью структуры к релаксации пиковых напряжений с одновременным упрочнением непосредственно в процессе динамического контак-



Рис. 2 – Зависимость износостойкости стали от скорости сканирования электрической дугой ($I = 100$ А):
 $F_N = 1$ МПа; $v_t = 1,6$ м/сек

ного нагружения.

После поверхностной тепловой обработки формируется феррито-бейнитная ориентированная гетерогенная структура (речный бейнит + игольчатый феррит), свойства которой изучались методом склерометрирования (скрэтч-анализа) с учетом влияния на результаты измерения нагрузочно-скоростных параметров тестирования.

На первом этапе исследовалось влияние на показатели тестирования скорости скрэтч-сканирования упрочненной зоны в диапазоне значений $v_S = 5-40$ мм/мин, при нормальных нагрузках на

индентор в диапазоне значений $F_N = 5 \div 20$ Н. Примеры скрэтч - диаграмм для двух нагрузок ($F_N = 10, 20$ Н) приведены на рис. 3 (шлифы I типа: трасса 1 - 1).

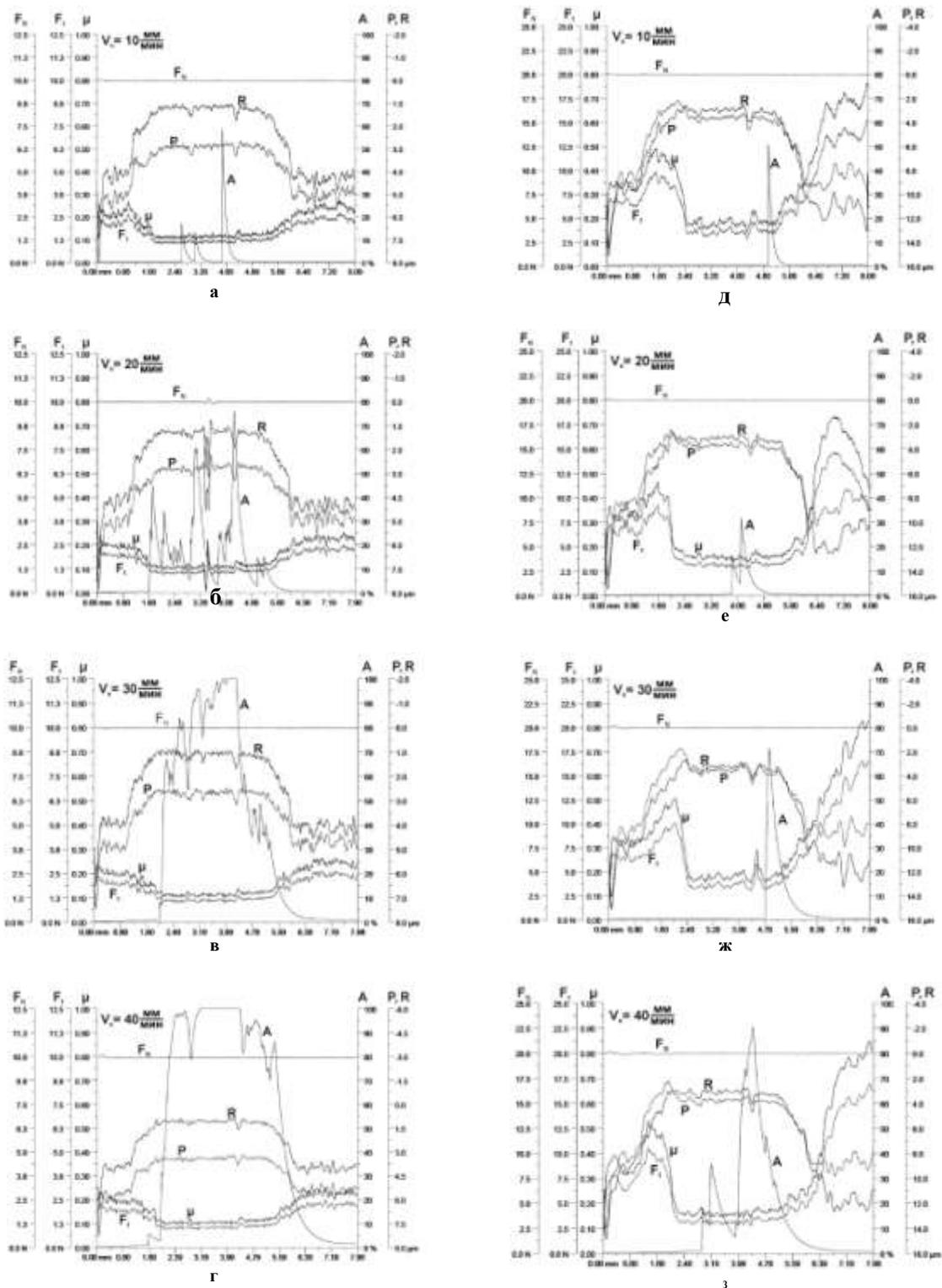


Рис. 3 – Влияние скорости сканирования v_s и нормальной нагрузки F_N на показатели скрэтч - тестирования термически упрочненной зоны ($L = 100$ А, $v_e = 600$ мм/мин):

а - г - $F_N = 10$ Н;

д - з - $F_N = 20$ Н;

направление сканирования 1 - 1:

F_N – нагрузка на индентор, Н; F_t – сила трения, Н; μ – коэффициент трения;
 P, R – соответственно, текущая и остаточная глубины внедрения индентора, мкм;
 A – акустическая эмиссия, %

После количественной обработки таких диаграмм получены зависимости интенсивности акустической эмиссии A от скорости скрэтч-сканирования v_S (рис. 4) и от нормальной нагрузки на индентор F_N (рис. 5). Интенсивность акустической эмиссии оценивалась по площади под кривой, характеризующей сигнал акустической эмиссии.

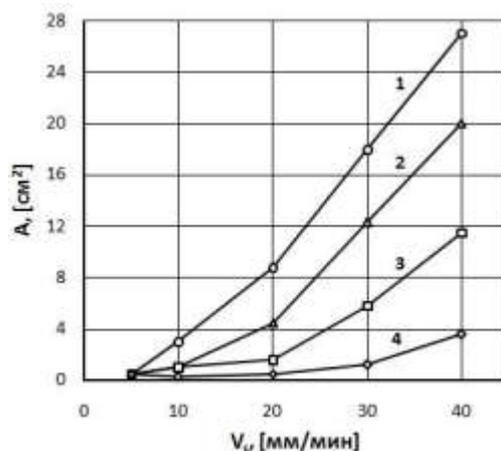


Рис. 4 – Зависимость акустико-эмиссионной активности зоны термического упрочнения от скорости скрэтч-тестирования: 1, 2, 3, 4 – соответственно; $F_N = 5, 10, 15, 20$ Н

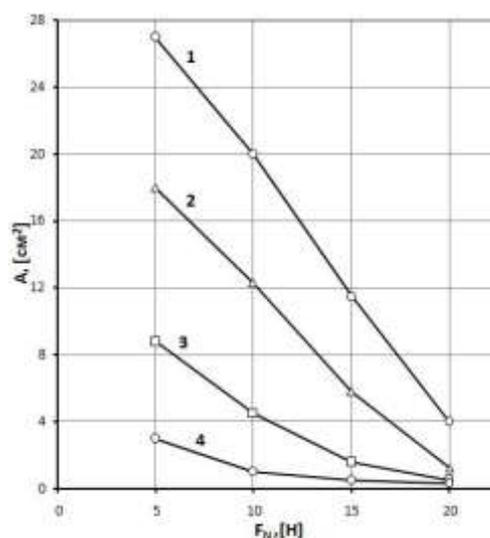


Рис. 5 – Зависимость акустико - эмиссионной активности зоны термического упрочнения от нагрузки на индентор: 1, 2, 3, 4 – соответственно; $v_S = 40, 30, 20, 10$ мм/мин

Из полученных данных вытекают следующие выводы.

1. С повышением скорости скрэтч - сканирования в указанном диапазоне значений растет акустико-эмиссионная активность зоны упрочнения стали – в тем большей степени, чем ниже контактная нагрузка на индентор (рис. 4).

2. При малой скорости сканирования ($v_S < 5$ мм/мин) акустическая эмиссия термически упрочненной зоны стремится к нулю.

3. С повышением нагрузки на индентор, несмотря на рост глубины его внедрения и увеличение силы трения, уровень акустической эмиссии снижается, причем интенсивность такого снижения возрастает с увеличением скорости склерометрирования (рис. 5).

4. При нагрузках на индентор более 30 - 40 Н независимо от скорости склерометрирования акустико-эмиссионная активность упрочненной стали стремится к нулю.

Обработка результатов измерений методом наименьших квадратов с помощью программы «Statistica» позволила трехмерно представить изучаемые зависимости (рис. 6), а также получить уравнение регрессии в следующем виде:

$$A = -2,1168 + 0,6217 \cdot v_S - 0,0249 \cdot F_N + 0,0086 \cdot v_S^2 - 0,0455 \cdot v_S \cdot F_N + 0,0114 F_N^2. \quad (2)$$

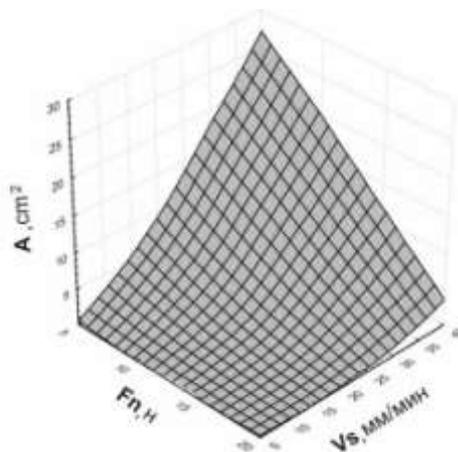


Рис. 6 – Влияние скорости скрэтч - сканирования и нормальной нагрузки на акустико - эмиссионную активность термически упрочненной зоны

Скорость скрэтч - сканирования практически не влияла на акустико-эмиссионную активность стали вне зоны оплавления. Эта активность во всех случаях приближалась к нулю, если нагрузка на индентор не превышала 35 - 40 Н. При более высоких нагрузках индентор погружался на глубину, при которой пластическая деформация и предельный механический наклеп сопровождалась возникновением микронесплошностей, вызывая акустическую эмиссию. Исходя из этого, становятся понятными результаты скрэтч-анализа поперечных шлифов II типа (трасса 2 - 2, рис. 1), приведенные на рис. 7.

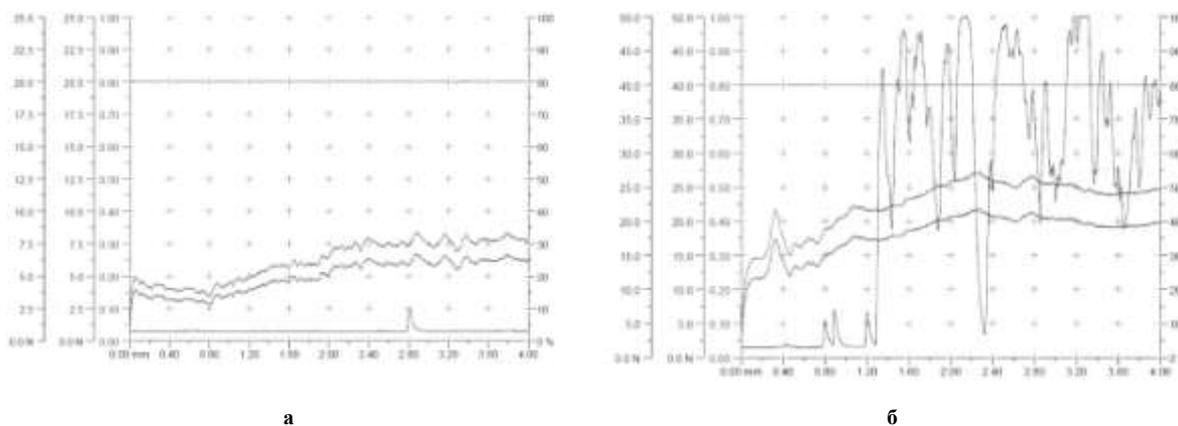


Рис. 7 – Влияние нагруженности индентора при скрэтч - тестировании (шлиф II типа, трасса 2 - 2) на акустико - эмиссионную активность стали в зоне оплавления (1) и вне этой зоны (2) при $v_S = 4$ мм/мин:
а – $F_N = 20$ Н;
б – $F_N = 40$ Н

Видно, что при малой скорости сканирования ($v_S = 4$ мм/мин) и высокой нагрузке на индентор ($F_N = 40$ Н) акустико - эмиссионная активность зоны упрочнения и прилегающих неупрочненных областей имеет характер, противоположный тому, который обсуждался выше. Это связано с изменением механизма возникновения акустической эмиссии: при механическом наклепе, вызываемом высокой нагрузкой, сталь вне зоны упрочнения охрупчивается и основным процессом релаксации напряжений становится образование релаксационных микротрещин, рост которых становится основным источником акустической эмиссии.

Из выполненных исследований (рис. 3) вытекают также дополнительные закономерности, касающиеся показателя упругого последствия, который рассчитывался по формуле:

$$S = \frac{P_R}{P} 100 \% . \quad (3)$$

1. С повышением скорости сканирования упрочненной зоны при практически не изменяющейся силе трения (для данной нагрузки $F_N = \text{const}$) имеет место некоторое снижение показателя упругого последствия S_o в диапазоне малых нагрузок (менее 20 Н) с последующей стабилизацией его значений (рис. 8).

2. С повышением нормальной нагрузки F_N при росте силы трения F_t показатели упругого последствия как упрочненной зоны (S_o), так и области вне этой зоны (S_w) снижаются (рис. 9), причем значения S_o значительно превышают S_w . Эта разница возрастает с уменьшением нормальной нагрузки F_N .

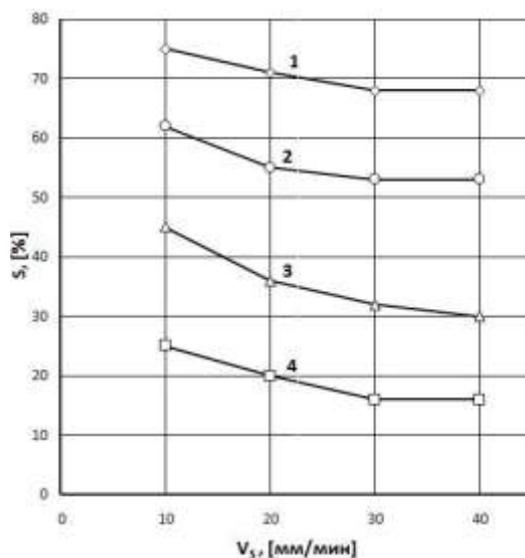


Рис. 8 – Влияние скорости скрэтч-сканирования v_s на показатель упругого последствия S_o :
1, 2, 3, 4 – соответственно, $F_N = 5, 10, 15, 20$ Н

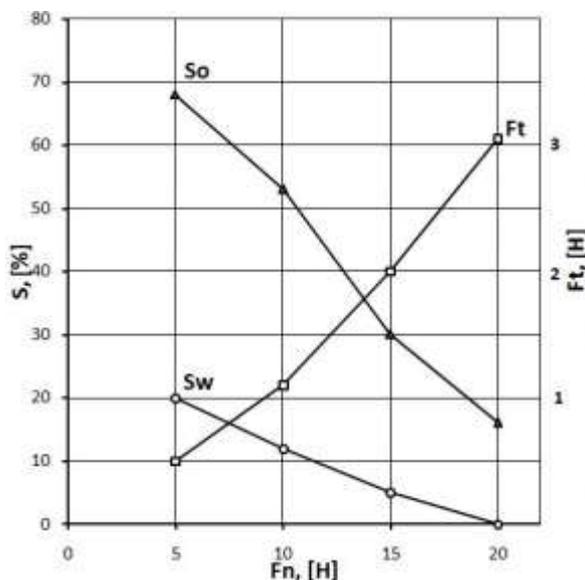


Рис. 9 – Влияние нормальной нагрузки F_N при скрэтч - сканировании на силу трения F_t , а также на показатели упругого последствия в зоне упрочнения S_o и вне этой зоны S_w при $v_s = 30$ мм/мин

Рис. 10 и соответствующее уравнение регрессии (4) дают трехмерное представление о зависимости показателя упругого последствия упрочненной зоны от нагрузочно - скоростных условий склерометрирования.

$$S_o = 94,9595 - 0,8243 \cdot v_s - 3,0141 \cdot F_N + 0,0145 \cdot v_s^2 - 0,0057 \cdot v_s \cdot F_N - 0,014 F_N^2 \quad (4)$$

Таким образом, склерометрическая сила трения и упругое последствие слабо зависят от скорости сканирования v_S , но сильно зависят от нагрузки на индентор F_N . В то же время акустико-эмиссионная активность A сильно зависит и от v_S , и от F_N . Нагрузочные зависимости акустической эмиссии и показателя упругого последствия термически упрочненной зоны имеют одинаковый характер, свидетельствуя о связи между ними. Высокий уровень акустической эмиссии имеет место тогда, когда в процессе трения сохраняется высокая степень упругого восстановления, а пластическая деформация не подавляет работу источников дислокаций.

Механизмы возникновения акустической эмиссии, как проявление релаксационных процессов при трении стали, термически упрочненной, и структуры нормализации за пределами зоны оплавления имеют разную природу.

Учитывая высокую акустико-эмиссионную активность изучаемой зоны упрочнения при небольших нагрузках на индентор, было исследовано влияние на показатели скрэтч - тестирования скорости сканирования в более широком диапазоне значений: от 5 до 400 мм/мин при нагрузках 5 и 10 Н. Пример такого тестирования для $F_N = 5$ Н показан на рис. 11.

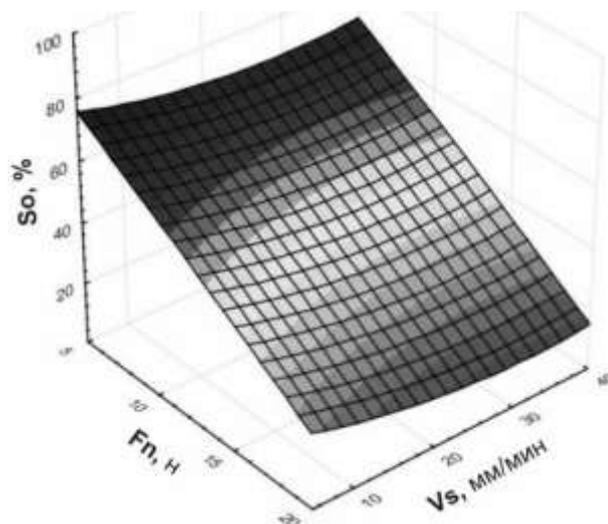


Рис. 10 – Зависимость показателя упругого последствия S_0 в зоне термического упрочнения стали от скорости скрэтч - сканирования v_S и нагрузки на индентор F_N

Установлено, что при определенных скоростях скрэтч-сканирования формируются максимумы акустической эмиссии (рис. 12): вблизи $v_S = 40$ мм/мин ($F_N = 5$ Н) и $v_S = 50$ мм/мин ($F_N = 10$ Н). Следовательно, при указанных нагрузочно-скоростных и температурных режимах трения реализуются наиболее благоприятные условия для развития локальных релаксационных процессов, обусловленных энергетической перестройкой микроструктуры.

Акустическая эмиссия вызывается не только разрывом атомных связей и разрушением структуры (например, при образовании релаксационных микротрещин), но и динамической локальной перестройкой структуры, сопровождающейся релаксацией внутренних напряжений с высвобождением энергии в виде упругих волн [4, 6]. Релаксируют обычно напряжения, сконцентрированные в зонах анизотропии и структурной неоднородности. Это, например, происходит при:

- отрыве дислокационных петель от точек закрепления;
- дискретных динамических процессах преодоления скоплениями дислокаций различных препятствий, что сопровождается быстрым локальным сдвигом;
- двойниковании, которое, как правило, происходит с большой скоростью, способствуя релаксации напряжений.

Указанным процессам способствуют метастабильность и дисперсность структуры (внутренний фактор), а также соответствующие температурно - скоростные условия контактного взаимодействия, обусловленные внешними факторами.

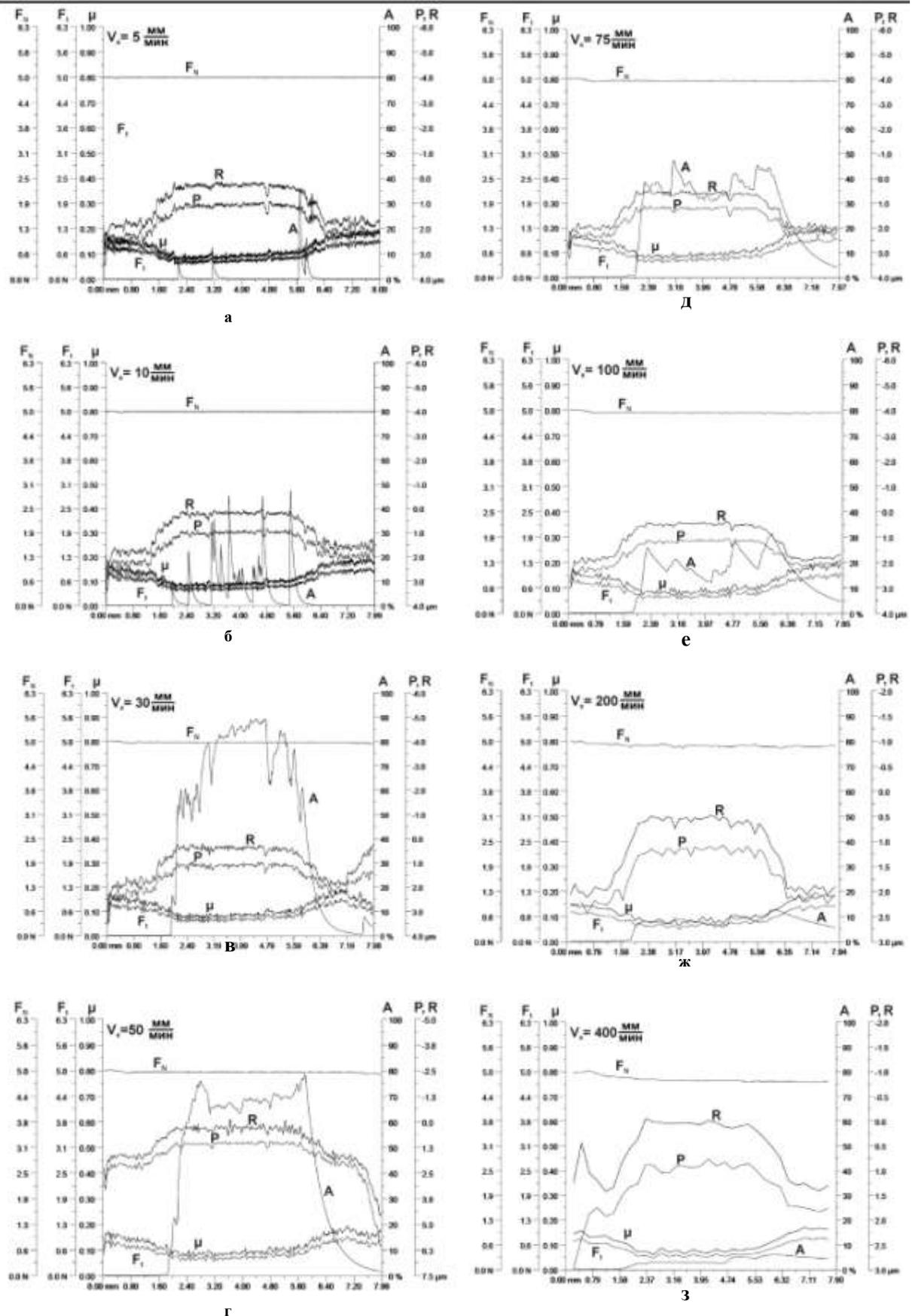


Рис. 11 – Влияние скорости сканирования v_s на показатели скрэтч - тестирования термически упрочненной зоны при $F_N = 5$ Н (шлифы I типа, трасса 1 - 1): а - з – соответственно $v_s = 5, 10, 30, 50, 75, 100, 200, 400$ мм/мин

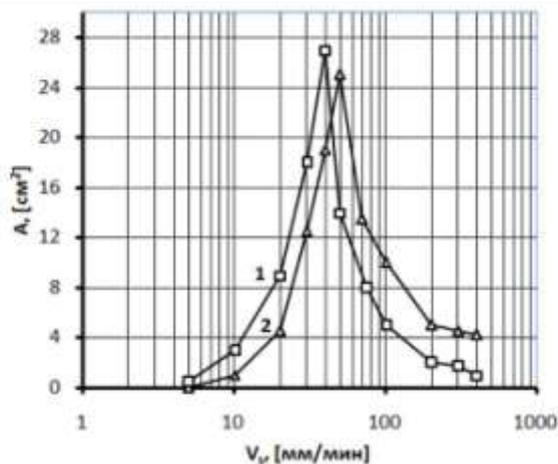


Рис. 12 – Влияние скорости скрэтч-сканирования на акустико-эмиссионную активность термически упрочненной зоны:
 1 – $F_N = 5$ Н;
 2 – $F_N = 10$ Н

Выводы

1. Износостойкость стали после термического упрочнения плазмой электрической дуги растет в 2,5 раза быстрее роста твердости материала, что свидетельствует о необходимости учета релаксационных свойств металла при трении.

2. Для термически упрочненной стали характерна высокая акустико-эмиссионная активность (АЭА), которая, являясь показателем триборелаксационной способности металла, в свою очередь, зависит от нагрузочно-скоростного режима контактного взаимодействия при скрэтч-тестировании.

3. С повышением нагрузки на индентор уровень АЭА в зоне упрочнения снижается, причем интенсивность такого снижения возрастает с увеличением скорости сканирования. Подобным образом изменяется и показатель упругого последействия, свидетельствуя об ухудшении релаксационных свойств материала после воздействия на исследуемую поверхность повышенных контактных нагрузок. Сталь неупрочненная, наоборот, проявляет АЭА только при больших нагрузках на индентор ($F_N = 40, 50$ Н), что связано с возникновением релаксационных микротрещин при охрупчивании вследствие наклепа.

4. АЭА упрочненной стали, как релаксационный показатель, при определенных скоростях сканирования v_s (зависящих от нагрузки в контакте) формирует максимумы значений: при $v_s < 5$ мм/мин АЭА стремится к нулю, при повышении v_s до 40 - 50 мм/мин АЭА существенно возрастает, а при дальнейшем росте v_s (до 400 мм/мин) АЭА монотонно спадает ($F_N = 5$ Н).

5. Выполненное скрэтч-тестирование, являясь модельной реализацией контактного взаимодействия поверхностей в условиях трения скольжения, свидетельствует о том, что при данной контактной нагрузке существует определенная скорость трения, вызывающая такую частоту вибрации и температуру в контакте, при которых проявляется максимальная эффективность динамической структурной перестройки, контролирующей релаксационные (диссипативные) процессы, часто приводящие к упрочнению.

Литература

1. Шевеля В.В., Трытек А.С., Калда Г.С. Влияние электродуговой обработки на структуру и износостойкость чугуна // Проблемы трибологии. – 2009. – № 2. – С. 6-12.
2. Шевеля В.В., Трытек А.С., Соколан Ю.С. Поверхностное упрочнение доэвтектоидной стали при быстрой кристаллизации // Проблемы трибологии. – 2011. – № 3. – С. 6-12.
3. Шевеля В.В., Олександренко В.П., Трытек А.С., Соколан Ю.С. Скрэтч-анализ формирования подповерхностных слоев при трении термообработанной стали // Проблемы трибологии. – 2015. – № 2. – С. 6-18.
4. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд. стандартов, 1976. – 272 с.
5. Новиков Н.В., Вайнберг В.Е. О физической природе акустической эмиссии при деформировании металлических материалов // Проблемы прочности. – 1977. – № 12. – С. 65-69.
6. Свириденко А.И., Мышкин Н.К., Калмыкова Т.Ф., Холодильников О.В. Акустические и электрические методы в триботехнике. – Минск: «Наука и техника», 1987. – 280 с.

Поступила в редакцию 14.12.2015

Shevelya V.V., Kupiec B., Sokolan J.S., Kalda G.S. **Sclerometric characteristics and acoustic-emissive activity of thermal strengthened steel.**

Effect of load and velocity scratch-testing regimes on tribological characteristics and rheological properties of contact with simultaneous acoustic emission registration after steel thermal strengthening by electroarc flashing with following fast crystallization was researched. It is shown, that acoustic-emission activity as indicator of relaxational ability on certain conditions of scratch-testing forms maximums. Mechanisms of acoustic emission changing and indicator of elastic aftereffect of steel in comparison with steel after thermal strengthening are discussed.

Keywords: scratch - testing, acoustic emission, wear resistance, friction coefficient, thermal strengthening, elastic aftereffect, flashing, crystallization, dislocations.

References

1. Shevelya V.V., Trytek A.S., Kalda G.S. Influence of electroarc treatment on structure and wear resistance of cast iron. *Problems of tribology*, 2009, № 2. p. 6-12.
2. Shevelya V.V., Trytek A.S., Sokolan J.S. Surface strengthening of hypoeutectoid steel provided by fast crystallization. *Problems of Tribology*, 2011, № 3. p. 6-12.
3. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P., Trytek A.S., Sokolan J.S. Scratch-analysis of subsurface layers formation provided by friction of thermal treated steel. *Problems of Tribology*, 2015, № 2. p. 6-18.
4. Greshnikov V.A., Drobot Yu.B. *Acoustic emission*. M.: Pub. of standards, 1976. 272 p.
5. Novikov N.V., Vinberg V.E. About physical nature of acoustic emission during deformation of metallic materials. *Problems of strength*, 1977, № 12. p. 65-69.
6. Sviridenyuk A.I., Myshkin N.K., Kalmykova T.F., Cholodilov O.V. *Acoustic and electric methods in tribotechnics*. Minsk: "Science and engineering", 1987. 280 p.