

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

* Жешувская политехника,

г. Жешув, Польша,

** Хмельницкий национальный университет,

г. Хмельницкий, Украина

E-mail: shevelya@prz.edu.pl

**ИЗМЕНЕНИЕ
ТРИБОЛОГО - РЕОЛОГИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ СТАЛИ
ПРИ ПОВТОРНО - ЦИКЛИЧЕСКОМ
ТРЕНИИ С УЧЕТОМ
ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА**

УДК 621.891

При оценке эффективности поверхностного термического упрочнения малоуглеродистой стали электродуговой обработкой исследовались изменения склерометрических показателей и акустическо-эмиссионной активности зоны трения в условиях повторно - однонаправленного и циклически-реверсивного скрэтч - тестирования в связи с влиянием контактной нагрузки. При реверсивном трении экспериментально установлен трибологический аналог эффекта Баушингера, степень проявления которого зависит от структурного состояния стали, контактной нагрузки, глубины контролируемого слоя и количества циклов фрикционного нагружения.

Ключевые слова: склерометрирование, скрэтч - анализ, износостойкость, сила трения, акустическая эмиссия, эффект Баушингера, термическое упрочнение, дислокации.

Введение

Для эффективного использования стали в узлах трения необходима информация о прочности, вязкоупругих свойствах поверхностных слоев и механизмах структурной перестройки, влияющих на формирование деформационных и адгезионных связей в процессе контактного взаимодействия. Такая возможность, в частности, открывается при проведении склерометрических исследований поверхностей (скрэтч-анализе) с одновременным использованием датчиков акустической эмиссии, регистрирующих упругие механические волны, возникающие при фрикционном взаимодействии индентора с изучаемой поверхностью [1 - 4]. При умеренных нагрузках на сканирующий индентор, особенно после механического упрочнения металла в зоне трения после первого цикла нагружения (при повторном склерометрировании), изменения трибологических и реологических показателей моделируют локальные процессы, сопровождающие контактное взаимодействие при традиционном трении скольжения, абразивном изнашивании и финишной обработке.

Ранее [3, 4] метод оценки склерометрических параметров и акустико - эмиссионной активности стали был применен в исследовании эффективности поверхностного термического упрочнения при локальном оплавлении металла плазмой электрической дуги с последующей его быстрой кристаллизацией. При этом проводилось однократное скрэтч-тестирование упрочненных поверхностей.

Представляло теоретический и практический интерес исследовать триболого - реологические свойства стали при многократном циклическом склерометрировании с целью выяснения отличий в микромеханизмах контактного взаимодействия при повторно-однонаправленном и циклически - реверсивном трении. Реверсивность трения является одним из важных факторов, влияющих на надежность машин. При реверсивном трении в поверхностных слоях металла формируется значительно более высокая плотность дислокаций и происходит разупрочнение, что приводит к повышенному, по сравнению с однонаправленным трением, износу [5]. При этом было высказано предположение о возможном проявлении при реверсивном трении эффекта Баушингера, подобного знакопеременному объемному нагружению. Однако прямого экспериментального подтверждения этого не было.

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 [4]. Сила тока дуги $I = 100$ А, скорость ее перемещения $v_e = 60$ см/мин. Исследуемая плитка-образец являлась составной частью проточного калориметра, благодаря чему ее нижняя поверхность охлаждалась потоком воды, обеспечивая ускоренную кристаллизацию оплавленных зон. При этом формировалась феррито - бейнитная ориентированная структура.

Трибологические и реологические свойства поверхностных слоев, а также их акустико-эмиссионная активность исследовались на скрэтч-трибометре RST (Revetest Scratch Tester) фирмы CSM Instruments (Швейцария). Принцип проведения скрэтч-тестирования описан ранее [3]. Исследовались

шлифы, выполненные на оплавленных поверхностях. Склерометрирование коническим алмазным индентором Роквелла осуществлялось поперек полос оплавления [4].

Скрэтч-тестирование проводилось при двух многоцикловых режимах: повторно-однонаправленном и циклически-реверсивном. При заданных скорости и нагрузке сканирования регистрировались склерометрические сила и коэффициент трения, текущая и остаточная глубины внедрения индентора, уровень акустической эмиссии. На первом режиме в каждом цикле оценивался реологический микропоказатель упругого последствия по формуле:

$$S = \frac{P-R}{P} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где P и R – соответственно, текущая (в процессе сканирования) и остаточная (после нагружения) глубины внедрения индентора. База сканирования составляла 7 - 8 мм, в которую входили собственно зона упрочнения (шириной около 5 мм) и прилегающие неупрочненные области.

Результаты исследования и их обсуждение

Повторно - однонаправленное трение. Ранее [3, 4] было установлено, что на показатели однократного скрэтч-тестирования с регистрацией акустической эмиссии влияют скорость сканирования изучаемой поверхности и нагрузка на индентор. Это подтверждают и данные, приведенные на рис. 1 и 2, которые иллюстрируют различия результатов циклического повторно-однонаправленного склерометрирования зоны упрочнения при двух скоростях ($v_S = 5, 30$ мм/мин; $F_N = 10$ Н).

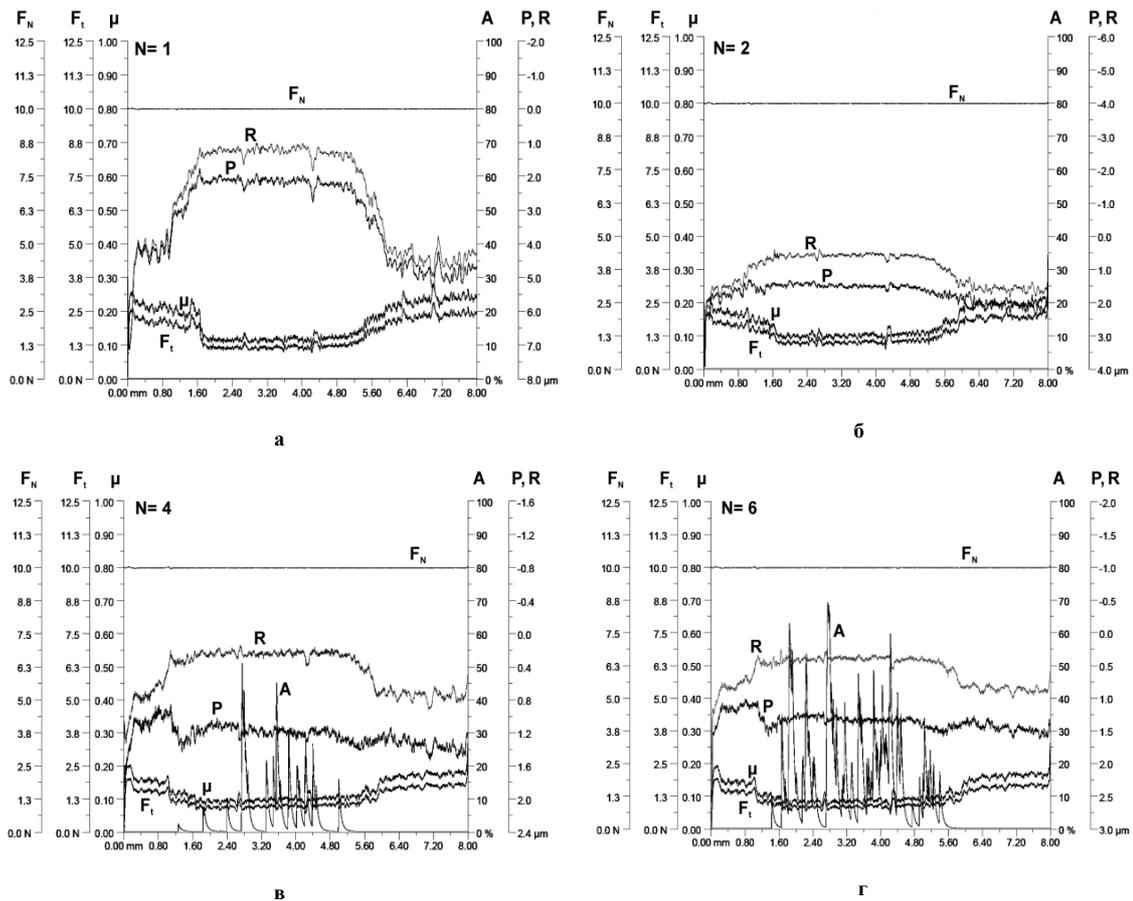


Рис. 1 – Изменение показателей скрэтч - тестирования зоны упрочнения при повторно - однонаправленном трении ($F_N = 10$ Н, $v_S = 5$ мм/мин);

а-г – соответственно, номера циклов: N = 1, 2, 4, 6 цикл.

(F_N – нормальная 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, %)

Видно, что при меньшей скорости сканирования $v_S = 5$ мм/мин (рис. 1) в первом и во втором циклах нагружения акустическая эмиссия не регистрируется, а первые акустические импульсы появляются лишь начиная с третьего - четвертого цикла. Повышение скорости скрэтч - тестирования до 30 мм/мин

(рис. 2) вызывает появление акустической эмиссии уже в первом цикле нагружения с последующим ростом ее интенсивности по мере увеличения числа циклов.

Сводные данные изменения триболого - реологических показателей стали в зоне термического упрочнения и за ее пределами в процессе повторно-однонаправленного трения ($F_N = 10$ Н; $v_s = 30$ мм/мин) приведены на рис. 3. Судя по скорости прироста суммарной глубины внедрения индентора R_Σ^O , R_Σ^W по мере циклического нагружения (рис. 3, а), более высокая (почти в 3 раза) износостойкость упрочненной стали по сравнению с исходным состоянием сохраняется на всем протяжении испытаний ($R_\Sigma^O \approx 3R_\Sigma^W$).

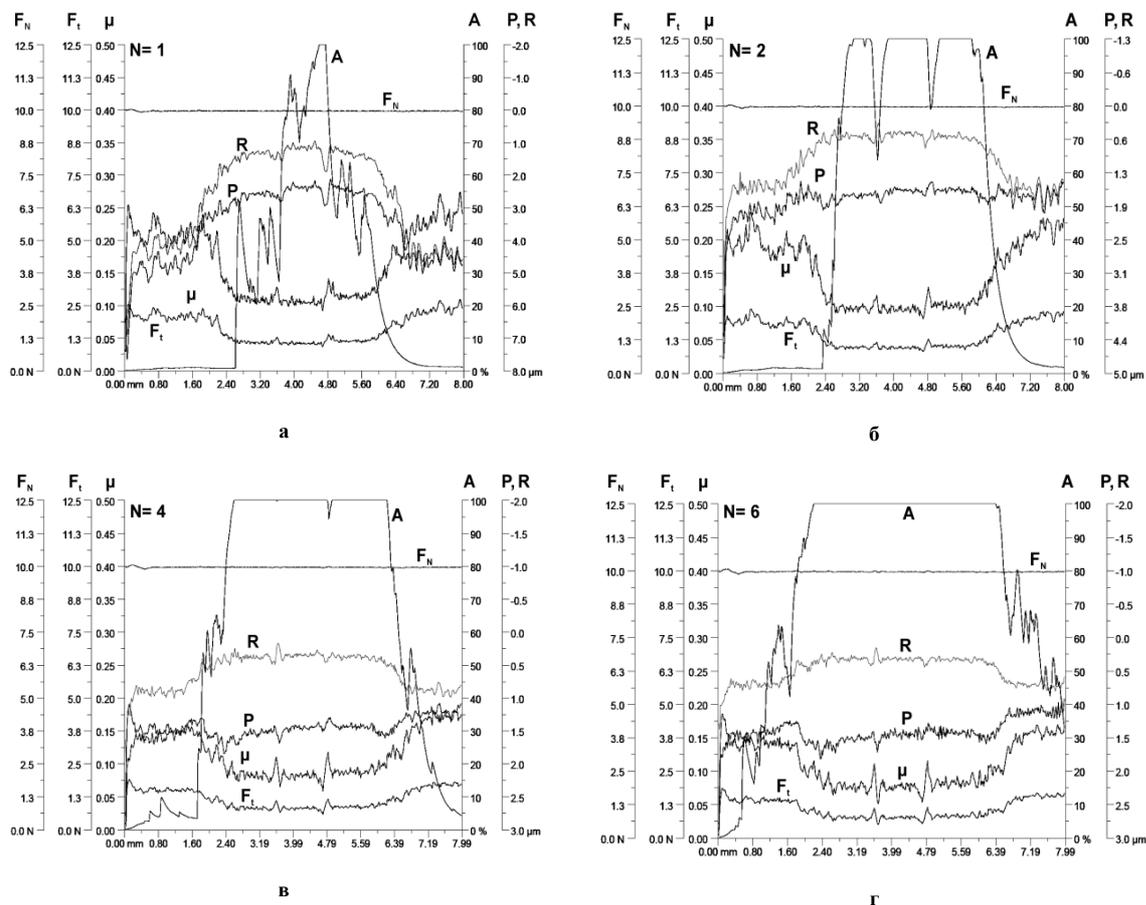


Рис. 2 – Изменение показателей скрэтч-тестирования зоны упрочнения при повышенной скорости трения ($F_N = 10$ Н, $v_s = 30$ мм/мин); а-г – соответственно, номера циклов: $N = 1, 2, 4, 6$ цикл. Обозначения те же, что и на рис.1

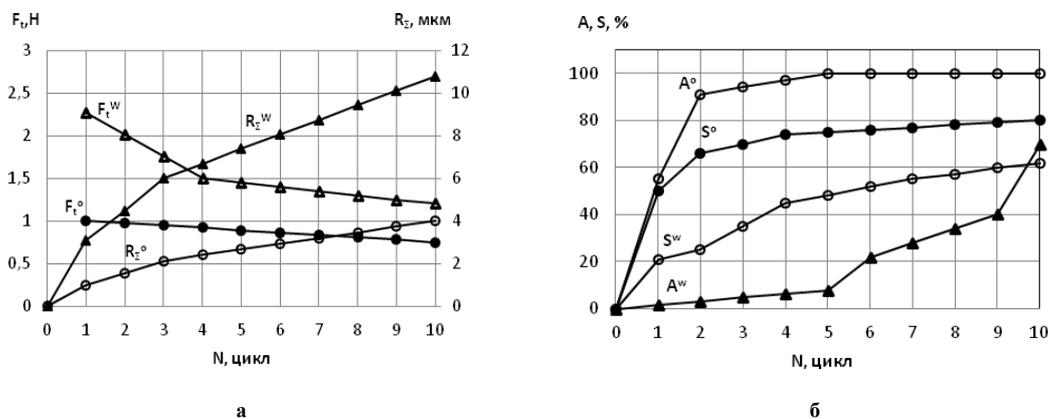


Рис. 3 – Влияние количества циклов повторно - однонаправленного трения ($F_N = 10$ Н, $v_s = 30$ мм/мин) на: а – суммарную остаточную глубину внедрения индентора (R_Σ^O, R_Σ^W) и силу трения (F_t^O, F_t^W); б – показатели акустической эмиссии (A^O, A^W) и упругого последствия (S^O, S^W)
Индексы W и O отвечают, соответственно, исходному и упрочненному состояниям стали

В первых циклах сканирования сила трения в упрочненной зоне в 2 - 2,5 раза меньше силы трения за пределами этой зоны (рис. 3, а). С ростом количества циклов повторного нагружения сила трения в обеих областях уменьшается, но для упрочненной зоны этот показатель значительно ниже и ведет себя более стабильно. С каждым новым циклом погружения индентора (на 1,5 - 2 мкм) увеличивается площадь контакта сопряжения с конической поверхностью индентора, что должно сопровождаться снижением контактного давления. В сочетании с механическим упрочнением стали это приводит к наблюдаемому снижению силы трения. Процессы контактного взаимодействия стабилизируются после третьего прямого цикла.

Мощность акустической эмиссии, активированной трением (рис. 3, б), уже с первых циклов нагружения в упрочненной зоне значительно превышает акустическую активность области, не подвергавшейся термическому упрочнению ($A^o \gg A^H$). Это является следствием более высокой релаксационной способности упрочненной стали, о чем дополнительно свидетельствует и более существенный рост в процессе контактного нагружения показателя упругого последействия ($S^o \gg S^H$).

Известно [2, 6, 7], что основными источниками акустической эмиссии при деформировании металлов являются дислокации, движущиеся с большими ускорениями после их отрыва от точек закрепления или после преодоления препятствий. Акустический эффект имеет место и при выходе дислокаций на поверхность кристаллов или при их аннигиляции. При этом происходит динамическая локальная перестройка структуры, сопровождающаяся релаксацией внутренних напряжений с высвобождением энергии в виде упругих акустических волн. Энергия акустических сигналов пропорциональна кинетической энергии дислокаций, а количество импульсов акустической эмиссии пропорционально плотности подвижных дислокаций. При значительной пластической деформации металла из-за роста общей плотности дислокаций снижается их подвижность и кинетическая энергия. Поэтому при нагружении металла выше предела текучести обычно уровень акустической эмиссии резко падает [2, 3]. Акустико - эмиссионная активность тем больше, чем меньше степень пластической деформации и ниже пластические свойства стали, когда деформация материала осуществляется меньшим количеством дислокаций, но имеющих высокую скорость движения и кинетическую энергию. Скорость дислокаций в пластичной стали из-за высокой их плотности будет меньше, что резко понижает амплитуду и количество импульсов акустической эмиссии.

На рис. 4 приведены примеры изменения склерометрических показателей в процессе контактного нагружения при более высокой нагрузке на индентор ($F_N = 20$ Н). В отличие от данных, представленных на рис. 2, акустиком-эмиссионная активность в этом случае начинает проявляться только со второго цикла нагружения с последующим повышением ее уровня по мере роста числа циклов.

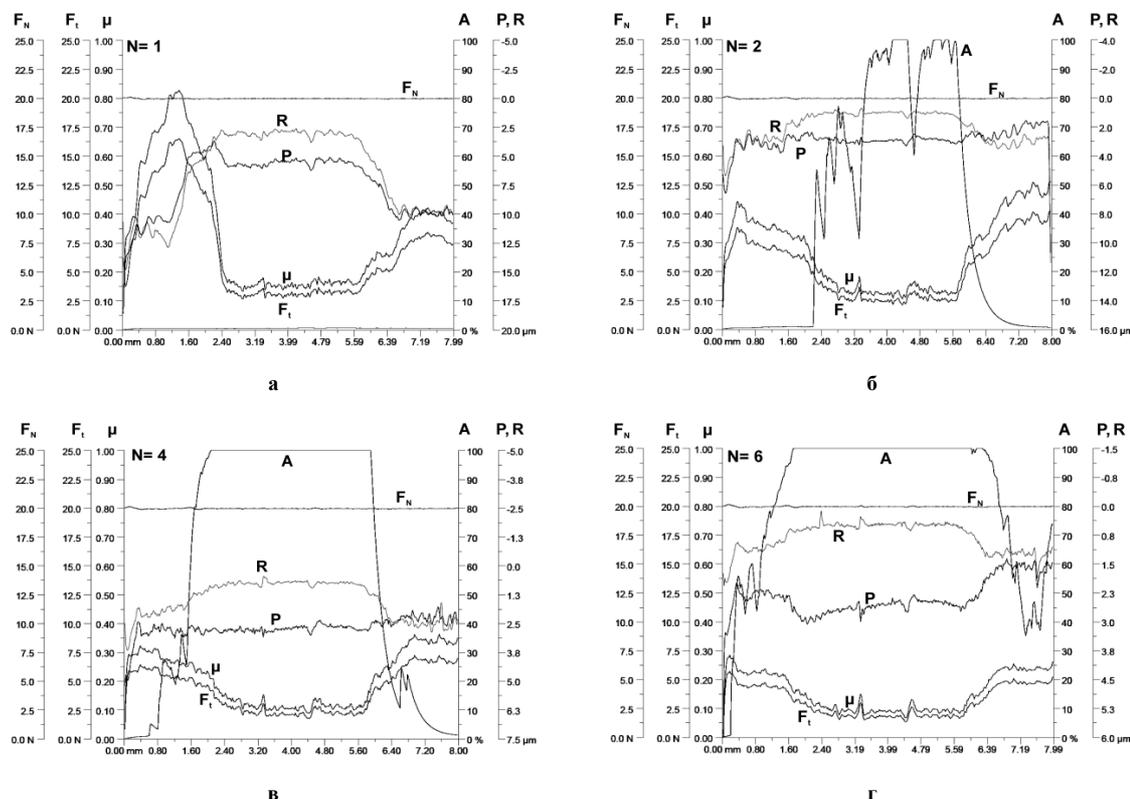


Рис. 4 – Изменение склерометрических показателей зоны упрочнения при повышенной нагрузке трения ($F_N = 20$ Н, $v_S = 30$ мм/мин);

а÷г – соответственно, номера циклов: N = 1, 2, 4, 6 цикл

Согласно обобщенным данным, приведенным на рис. 5, термическое упрочнение стали и при более тяжелом режиме трения обеспечивает почти трехкратное повышение износостойкости.

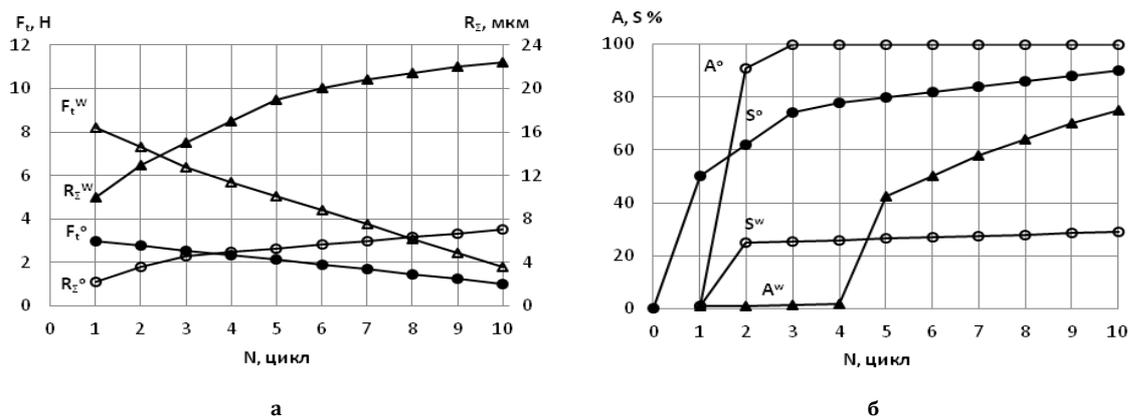


Рис. 5 – Влияние количества циклов повторно-однонаправленного трения ($F_N=20$ Н, $v_S=30$ мм/мин) на:
 а – суммарную остаточную глубину внедрения индентора ($R_{\Sigma}^o, R_{\Sigma}^w$) и силу трения (F_t^o, F_t^w);
 б – показатели упругого последствия (S^o, S^w) и акустической эмиссии (A^o, A^w)

Кроме первого цикла нагружения, общие закономерности изменения склерометрических показателей подобны результатам, полученным при $F_N=10$ Н (рис. 3). Отсутствие акустической эмиссии в первом цикле нагружения обусловлено большой пластической деформацией, вызываемой более глубоким внедрением и тангенциальным перемещением индентора, когда из-за высокой плотности дислокаций затрудняется их перемещение и блокируется работа источников дислокаций. В дальнейшем уже сканируется металл, претерпевший механическое упрочнение.

Циклически - реверсивное трение. На рис. 6 показаны примеры скрэтч-анализа при циклически-реверсивном сканировании образцов как непосредственно в зоне упрочнения, так и в неупрочненных областях, к ней прилегающих. Нечетные проходы индентора по одной и той же трассе будем считать прямыми циклами, а четные (при реверсе) – обратными.

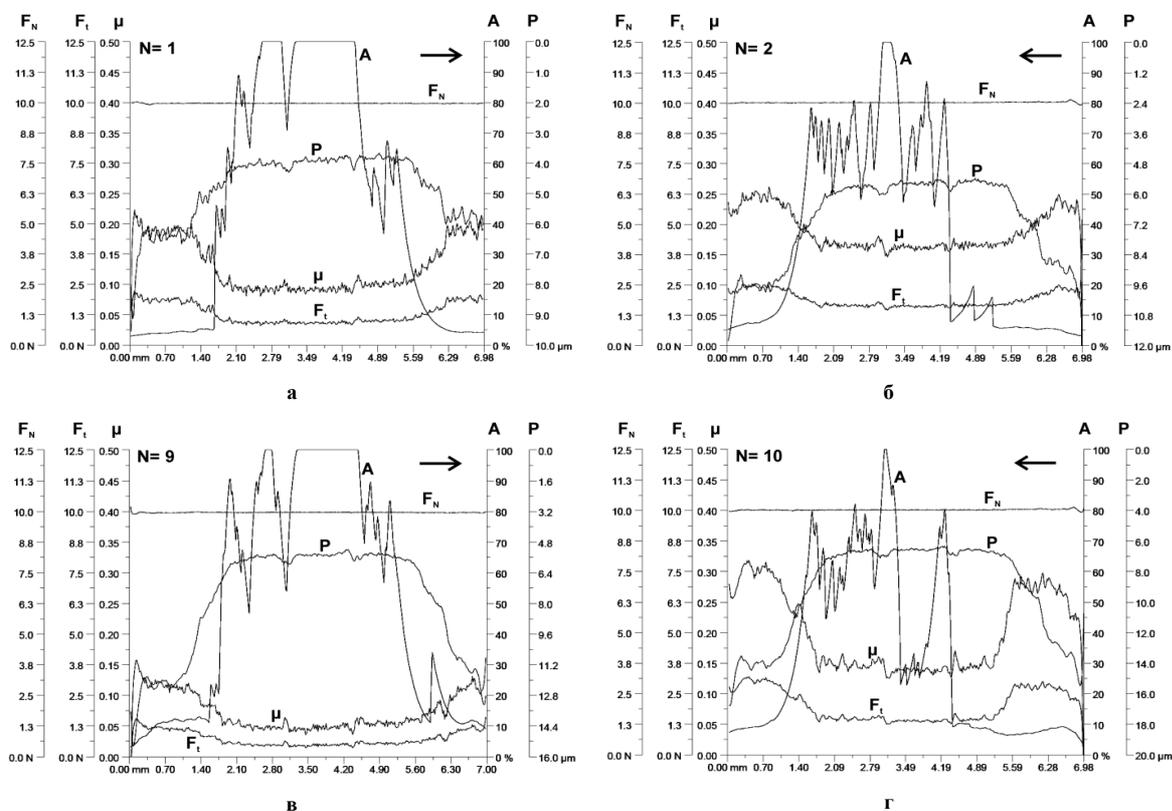


Рис. 6 – Изменение склерометрических показателей зоны упрочнения при циклически - реверсивном трении ($F_N=10$ Н, $v_S=30$ мм/мин); а;г – соответственно, номера циклов: $N=1, 2, 9, 10$ цикл

Примечательно, что акустико-эмиссионная активность упрочненной зоны изменяется циклически в процессе реверсивного трения: мощность акустических импульсов всегда выше в нечетных (прямых) циклах сканирования и существенно ниже в четных (обратных) циклах (рис. 7,а). От первого до десятого цикла это соотношение уровней акустической активности сохраняется практически неизменным.

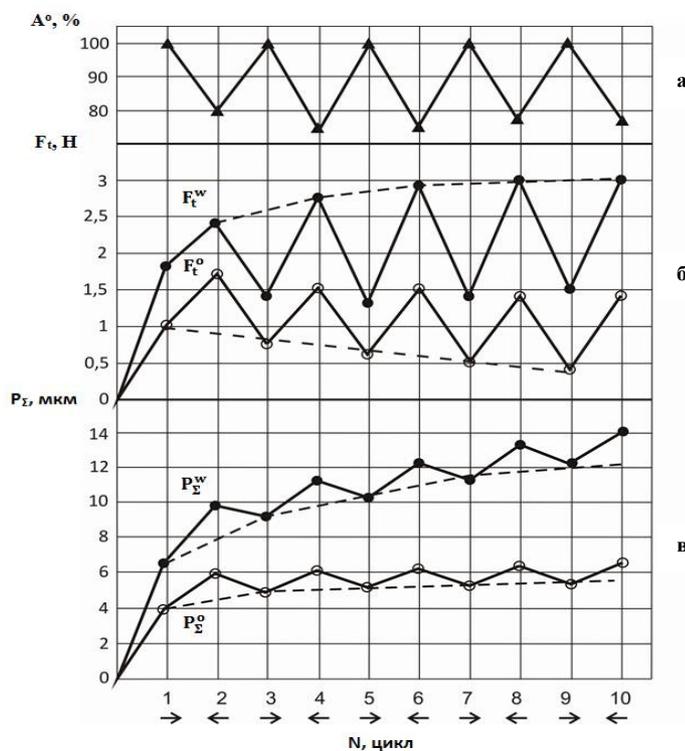


Рис. 7 – Влияние количества циклов реверсивного трения ($F_N = 10$ Н, $v_S = 30$ мм/мин) на:

а – уровень акустической эмиссии (A°) в зоне упрочнения;

б – силу трения (F_t^O, F_t^W);

в – глубину внедрения индентора в цикле (P_Σ^W, P_Σ^O).

Индексы W и O отвечают, соответственно, исходному и упрочненному состояниям стали

Из обобщенных данных, приведенных на рис. 7, видно, что в противофазе с сигналами акустической эмиссии в зоне упрочнения (рис. 7, а) циклически изменяются сила трения (рис. 7, б) и глубина внедрения индентора в цикле (рис. 7, в): максимумам силы трения в цикле F_t^O и глубины внедрения индентора P_Σ^O отвечают минимумы показателя акустической эмиссии (A°). Циклическость изменения силы трения и глубины внедрения индентора характерна и для неупрочненной стали (рис. 7, б, в): в четных (обратных) циклах нагружения значения F_t^W и P_Σ^W значительно выше по сравнению с нечетными (прямыми) циклами.

Отмеченные выше закономерности являются следствием трибологического проявления эффекта Баушингера [8], когда при изменении направления сдвиговой деформации в четных циклах контактного нагружения снижаются пределы упругости и текучести, вследствие чего материал ведет себя более пластично; индентор погружается более глубоко, вызывая рост деформационной составляющей силы трения. Рост пластичности упрочненной стали в четных циклах сопровождается снижением акустической эмиссии. Более высокая акустико - эмиссионная активность упрочненной зоны в нечетных циклах сканирования обусловлена более упругим поведением материала. По - видимому, в этом случае после нагружения происходит частичное упругое восстановление профиля дорожки трения, что приводит к некоторому снижению остаточной глубины внедрения индентора.

При сканировании неупрочненной зоны с ростом числа циклов нагружения «верхние» значения силы трения F_t^W в четных (обратных) циклах нагружения непрерывно повышаются, а «нижние» значения в нечетных (прямых) циклах изменяются мало. В то же время указанные показатели в зоне упрочненной (F_t^O) имеют тенденцию к снижению (рис. 7, б).

Судя по глубине внедрения индентора, упрочненная сталь в среднем имела в 2 раза большую износостойкость по сравнению с исходным состоянием (рис. 7, в). На этапе стабилизации фрикционного взаимодействия скорость изнашивания упрочненной стали оставалась на низком уровне (0,07 мкм/цикл), в то время как скорость изнашивания неупрочненной стали была в 7 раз большей (0,5 мкм/цикл).

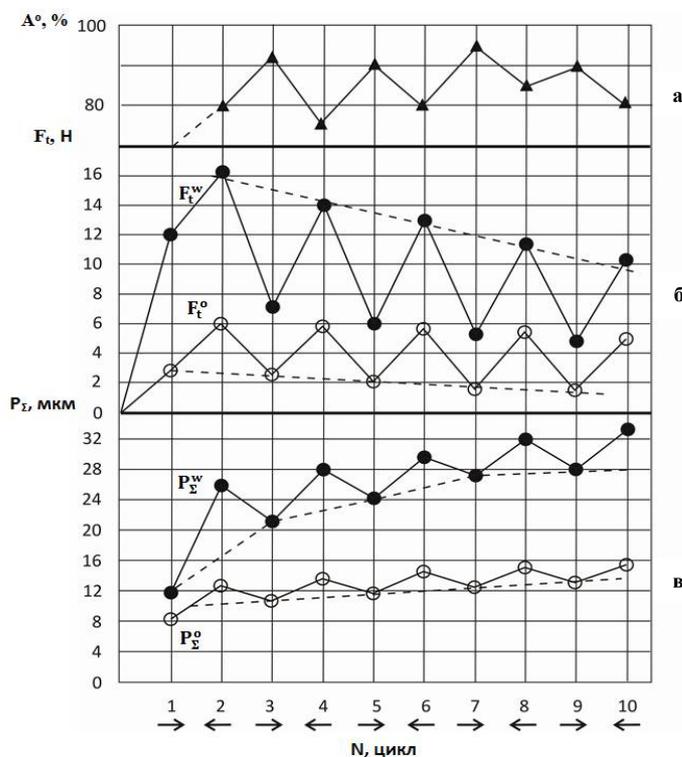


Рис. 8 – Влияние количества циклов реверсивного трения при повышенной контактной нагрузке ($F_N = 20$ Н, $v_s = 30$ мм/мин) на:
а – уровень акустической эмиссии (A°) в зоне упрочнения;
б – силу трения (F_t^O, F_t^W);
в – глубину внедрения индентора в цикле (P^W, P^O)

При повышении нагрузки на индентор до $F_N = 20$ Н (рис. 8) общий характер рассмотренных выше закономерностей сохраняется с той лишь разницей, что для стали неупрочненной с ростом числа циклов нагружения «верхние» и «нижние» значения силы трения непрерывно снижаются (рис. 8, б). Причем это снижение происходит более быстро по сравнению со сталью упрочненной, свидетельствуя о значительном деформационном наклепе материала. В этих условиях на установившейся стадии реверсивного трения упрочненная сталь по глубине внедрения индентора показала в 3 раза меньшую скорость изнашивания (0,3 мкм/цикл против 0,9 мкм/цикл).

Известно, что упомянутый выше эффект Баушингера имеет место при работе изделий при знакопеременном нагружении и проявляется в снижении сопротивления циклическим неупругим деформациям при изменении знака нагружения, когда, например, растяжению предшествует сжатие и наоборот [8, 9]. При многократных знакопеременных нагружениях наблюдается так называемый циклический эффект Баушингера [9, 10]. Это фундаментальное физическое явление объясняют влиянием возникающих при первоначальном деформировании остаточных ориентированных микронапряжений, которые, суммируясь с напряжениями, создаваемыми последующей внешней нагрузкой противоположного знака, вызывают снижение сопротивления пластической деформации. В первом и в последующих нечетных циклах трения возникающие у препятствий скопления дислокаций создают поля остаточных напряжений, действующих в направлении, противоположном направлению первоначального трения. При последующем трении противоположного знака (четные циклы) эти внутренние напряжения, суммируясь с внешним воздействием, способствуют движению дислокаций в новом направлении, что и проявляется в повышении пластичности зоны фрикционного контакта. Следует также учитывать, что при первоначальном нагружении может происходить задержка движущихся дислокаций вследствие увеличивающейся плотности дислокаций «леса», пронизывающих плоскость скольжения (механизм Орована [8]). При обратном движении дислокаций, обусловленном изменением знака действующих напряжений, на их пути будет встречаться меньше препятствий. Тем самым возникает анизотропия препятствий скольжению при изменении направления трения. Таким образом, при обратном нагружении трением перемещение подвижных

дислокаций осуществляется в областях, сравнительно свободных от дислокаций «леса», и при отсутствии условий для эффективного закрепления дислокаций примесными атомами предел упругости стали понижается, что проявляется в росте микропластичности. При этом активизируется большее количество плоскостей скольжения в кристаллической решетке, что дополнительно способствует снижению сопротивления металла обратному деформированию, увеличению глубины внедрения индентора и, как следствие, к наблюдаемому росту силы трения.

В качестве трибологического показателя эффекта Баушингера при циклическом реверсивном трении была принята величина:

$$\beta = \frac{F_t^i}{F_t^{i-1}},$$

где F_t^i – сила трения в четном (обратном) цикле;

F_t^{i-1} – сила трения в предыдущем (нечетном) цикле.

Влияние реверсивного контактного нагружения на эффект Баушингера иллюстрирует рис. 9.

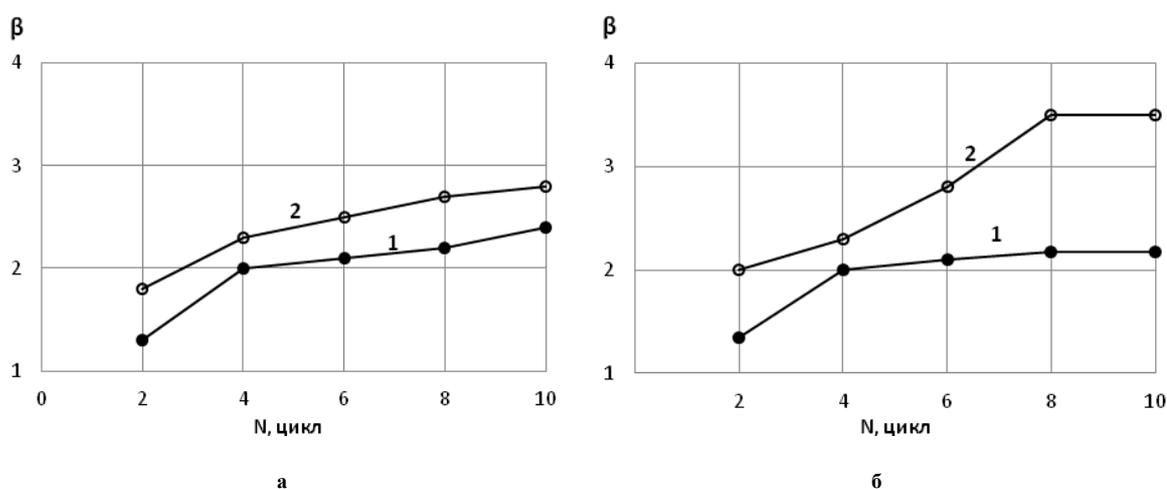


Рис. 9 – Зависимость трибологического показателя эффекта Баушингера от номера обратного цикла реверсивного трения ($v_s = 30$ мм/мин) при $F_N = 10$ Н (а) и $F_N = 20$ Н (б): 1 – исходная структура; 2 – упрочненная структура

Для обоих структурных состояний стали циклическое реверсивное нагружение вызывает рост эффекта Баушингера. Для стали неупрочненной повышение нагрузки на индентор от 10 Н до 20 Н практически не изменяет зависимость показателя изучаемого эффекта от количества циклов (рис. 9, а, б; кривые 1). Сталь упрочненная характеризуется более значительной чувствительностью к изменению знака нагружения и большим эффектом Баушингера, что особенно проявляется при нагрузке $F_N = 20$ Н и числе циклов $N > 4$ (рис. 9, б, кривая 2). При этой же нагрузке выявляется определенная степень суммарной сдвиговой деформации (при $N \geq 8$), которая соответствует максимальному стабилизированному значению показателя эффекта Баушингера для данной структуры стали.

Выводы

1. Термическое упрочнение стали методом плазменного поверхностного оплавления с быстрой кристаллизацией обеспечивает трехкратное повышение износостойкости в условиях повторно-однонаправленного трения и более чем двухкратное – при циклически - реверсивном трении.

2. На установившемся этапе реверсивного трения ($F_N = 10$ Н) скорость изнашивания упрочненной стали была в семь раз меньшей по сравнению с неупрочненной структурой. При двухкратном повышении нагрузки на индентор ($F_N = 20$ Н) этот показатель снижался до трех.

3. Упрочненную сталь характеризует высокая акустико-эмиссионная активность и более выраженное упругое последствие в каждом цикле контактного нагружения. С увеличением количества циклов указанные показатели упрочненной стали были значительно выше по сравнению с неупрочненной, свидетельствуя о более высокой релаксационной способности и интенсивном ее росте в процессе трения.

4. В условиях реверсивного трения наблюдается эффект Баушингера, который трибологически проявляется в циклическом изменении силы трения и глубины внедрения индентора, в противофазе с которыми изменяется акустико-эмиссионная активность зоны фрикционного контакта при каждом изменении направления трения.

5. По мере циклического реверсивного контактного нагружения стали эффект Баушингера возрастает. Сталь упрочненная характеризуется более выраженным эффектом Баушингера и его проявление существенно растет при повышении контактной нагрузки.

6. Трибологический аспект эффекта Баушингера и возможности его практического применения изучены недостаточно. В то же время известны примеры успешного применения этого явления в технологии машиностроения, связанные, в частности, с повышением точности и снижением энергозатрат при обработке деталей резанием, при упрочнении поверхностным пластическим деформированием [11], а также при комбинированной обработке металлов волочением [12]. Реверсивность трения, влияя на распределение остаточных напряжений в зоне контакта, приводит к уменьшению растягивающих напряжений и снижению наклепа по сравнению с односторонним трением [5]. Реализация эффекта Баушингера позволяет повысить несущую способность валов [13] и интенсифицировать технологические процессы [11, 12], что свидетельствует об актуальности и перспективности трибологических научно-прикладных разработок этого направления.

Литература

1. Дубровин А.М., Комков О.Ю., Мышкин Н.К. Анализ акустической эмиссии на микротрибометре возвратно-поступательного типа // Трение и износ, 2004, т.256, № 4. – С. 363-367.
2. Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Сарычев Т.А., Щавелин В.Н. Акустическая эмиссия при трении. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 256 с.
3. Шевеля В.В., Александренко 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. Шевеля В.В., Купец Б., Соколан Ю.С., Калда Г.С. Склерометрические показатели и акустико-эмиссионная активность термически упрочненной стали // Проблемы трибологии. – 2016. – № 1. – С. 6-15.
5. Евдокимов В.Д. Реверсивность трения и качество машин. – К.: Техника, 1977. – 145 с.
6. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд. стандартов, 1976. – 272 с.
7. Кузнецов Н.С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1998. – 96 с.
8. Маклинток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. – М: Мир, 1973. – 443 с.
9. Грачев С.В. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению. – М.: Металлургия, 1976. – 152 с.
10. Романов А.И., Гаденин М.М. Методы определения циклического эффекта Баушингера // Заводская лаборатория. – 1972. – №1. – С. 99-102.
11. Линчевский П.А., Новожилов С.В., Кудряков М.Б. Совершенствование технологии обработки металлов резанием и пластическим деформированием с учетом использования эффекта Баушингера // Труды Одесского политехнического университета. – 2008. – Вып. 2(30). – С. 73-76.
12. Щедрин А.В., Ульянов В.В., Бакаев А.А. и др. Рациональная область применения эффекта Баушингера в комбинированных методах волочения // Автомобильная промышленность. – 2012. – №6. – С. 35-37.
13. Хван А.Д., Пустовалов С.В., Хван Д.В. Повышение несущей способности валов // Тяжелое машиностроение. – 2010. – №9. – С. 15-17.

В исследованиях использовано оборудование, закупленное согласно проекта № POP 01.03.00-18-012/09 в рамках Программы развития Восточной Польши, финансируемой Европейским Союзом из средств Европейского Фонда Регионального развития.

Поступила в редакцию 19.04.2017

Shevelya V.V., Kupiec B., Kalda G.S., Sokolan J.S. **Changing of tribological and rheological properties in the process of repeatedly-cycling friction considering baushinger's effect.**

When evaluating the effectiveness of surface thermic strengthening of mild steel by electroarc treatment, the changes of sclerometric indices and acoustic-emission activity of friction zone under conditions of repeatedly-monodirectional and cyclically reversed scratch testing as a result of contact load were studied. In the process of reversed friction, the tribologic analog of Baushinger's effect was determined; the level of its occurrence depends on steel structure state, contact load, depth of controlled layer and quantity of frictional load.

Key words: sclerometric testing, scratch-analysis, wear resistance, frictional force, acoustic emission, Baushinger's effect, thermal strengthening, dislocations.

References

1. Dubrovin A.M., Komkov O.Ju., Myshkin N.K. Analiz akusticheskoj jemissii na mikrotribo-metre vozvratno-postupatel'nogo tipa. *Trenie i iznos*, 2004, t.25b, № 4. S. 363-367.
2. Baranov V.M., Kudrjavcev E.M., Sarychev T.A., Shhavelin V.N. Akusticheskaja jemissija pri tre-nii. M.: Jenergoatomizdat, 1998. 256 s.
3. Shevelja V.V., Oleksandrenko V.P., Trytek A.S., Sokolan Ju.S. Skrjetch-analiz formirovanija podpoverhnostnyh sloev pri trenii termoobrabotannoju stali. *Problemy tribologii*. 2015. № 2. S. 6-18.
4. Shevelja V.V., Kupec B., Sokolan Ju.S., Kalda G.S. Sklerometricheskie pokazateli i akustiko-jemissionnaja aktivnost' termicheski uprochnennoj stali. *Problemy tribologii*. 2016. № 1. S. 6-15.
5. Evdokimov V.D. Reversivnost' trenija i kachestvo mashin. K. Tehnika, 1977. 145 s.
6. Greshnikov V.A., Drobot Ju.B. Akusticheskaja jemissija. M. Izd. standartov, 1976. 272 s.
7. Kuznecov N.S. Teorija i praktika nerazrushajushhego kontrolja izdelij s pomoshh'ju akustiche-skoj jemissii. M. Mashinostroenie, 1998. 96 s.
8. Maklintok F., Argon A. Deformacija i razrushenie materialov. M: Mir, 1973. 443 s.
9. Grachev S.V. Termicheskaja obrabotka i soprotivlenie splavov povtornomu nagruzeniju. M. Metallurgija, 1976. 152 s.
10. Romanov A.I., Gadenin M.M. Metody opredelenija ciklicheskogo jeffekta Baushingera. *Za-vodsckaja laboratorija*. 1972. №1. S. 99-102.
11. Linchevskij P.A., Novozhilov S.V., Kudrjakov M.B. Sovershenstvovanie tehnologii obrabotki metallov rezaniem i plasticheskim deformirovaniem s uchetom ispol'zovanija jeffekta Baushingera. *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta*. 2008. Vyp. 2(30). S. 73-76.
12. Shhedrin A.V., Ul'janov V.V., Bakaev A.A. i dr. Racional'naja oblast' primenenija jeffekta Baushingera v kombinirovannyh metodah volochenija. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2012. №6. S. 35-37.
13. Hvan A.D., Pustovalov S.V., Hvan D.V. Povyshenie nesushhej sposobnosti valov. *Tjazeloe mashinostroenie*. 2010. №9. S. 15-17.