

Шевеля В.В., *, **

Купец Б., *

Калда Г.С., **

Соколан Ю.С., **

*Жешувская политехника,

г. Жешув, Польша,

shevelya@prz.edu.pl

**Хмельницкий национальный университет,

г. Хмельницкий, Украина

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 односторонним 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 (200×50×10 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, выпол-

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

Скрэтч-тестирование проводилось при двух многоцикловых режимах: повторно-однаправленном 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 последействия 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-однаправленное 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-однаправленного склерометрирования зоны упрочнения при двух скоростях ($v_s = 5, 30$ мм/мин; $F_N = 10$ Н).

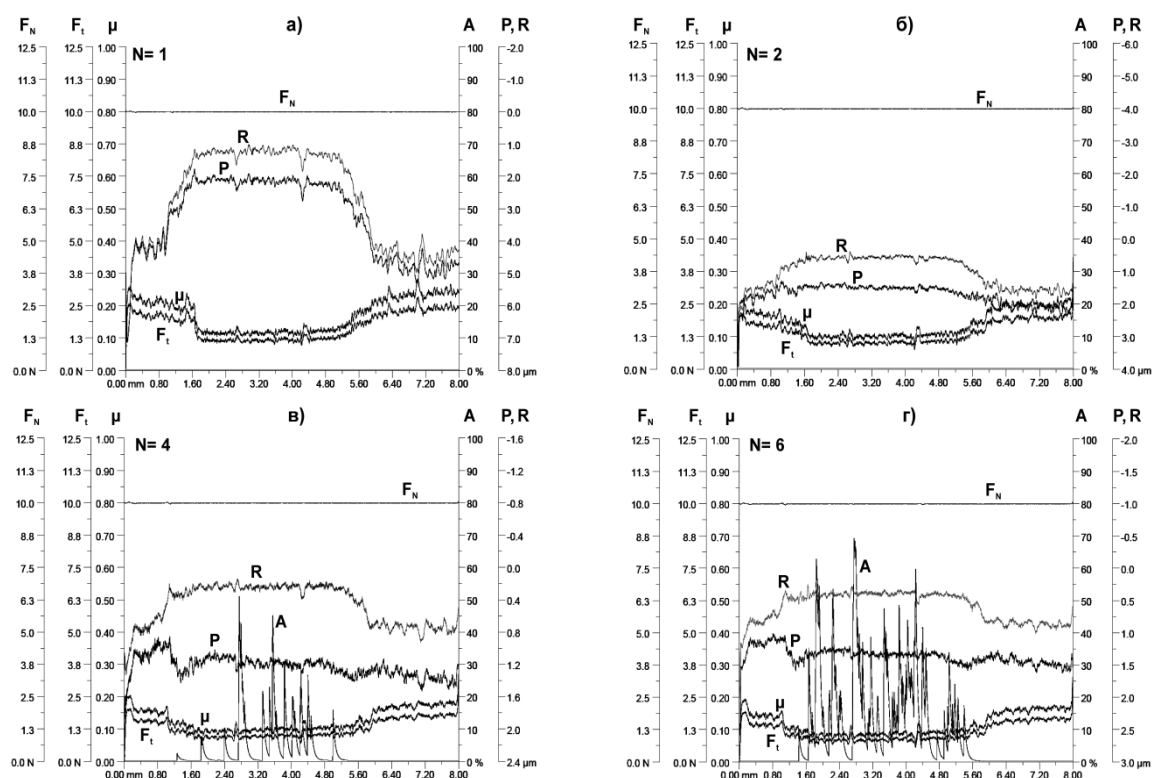


Рис. 1 – Изменение показателей скрэтч-тестирования зоны упрочнения при повторно-однаправленном трении ($F_N = 10$ Н, $v_s = 5$ мм/мин); а÷г – соответственно, номера циклов: $N = 1, 2, 4, 6$ цикл. (F_N – нормальная нагрузка на индентор, Н; F_t – сила трения, Н; μ – коэффициент трения; P, R – соответственно, 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-однаправленного трения ($F_N = 10$ Н; $v_s = 30$ мм/мин)

приведены на рис. 3. Судя по скорости прироста суммарной глубины внедрения индентора $R_{\Sigma}^O, R_{\Sigma}^W$ по мере циклического нагружения (рис. 3а), более высокая (почти в 3 раза) износостойкость упрочненной стали по сравнению с исходным состоянием сохраняется на всем протяжении испытаний ($R_{\Sigma}^O \approx 3R_{\Sigma}^W$).

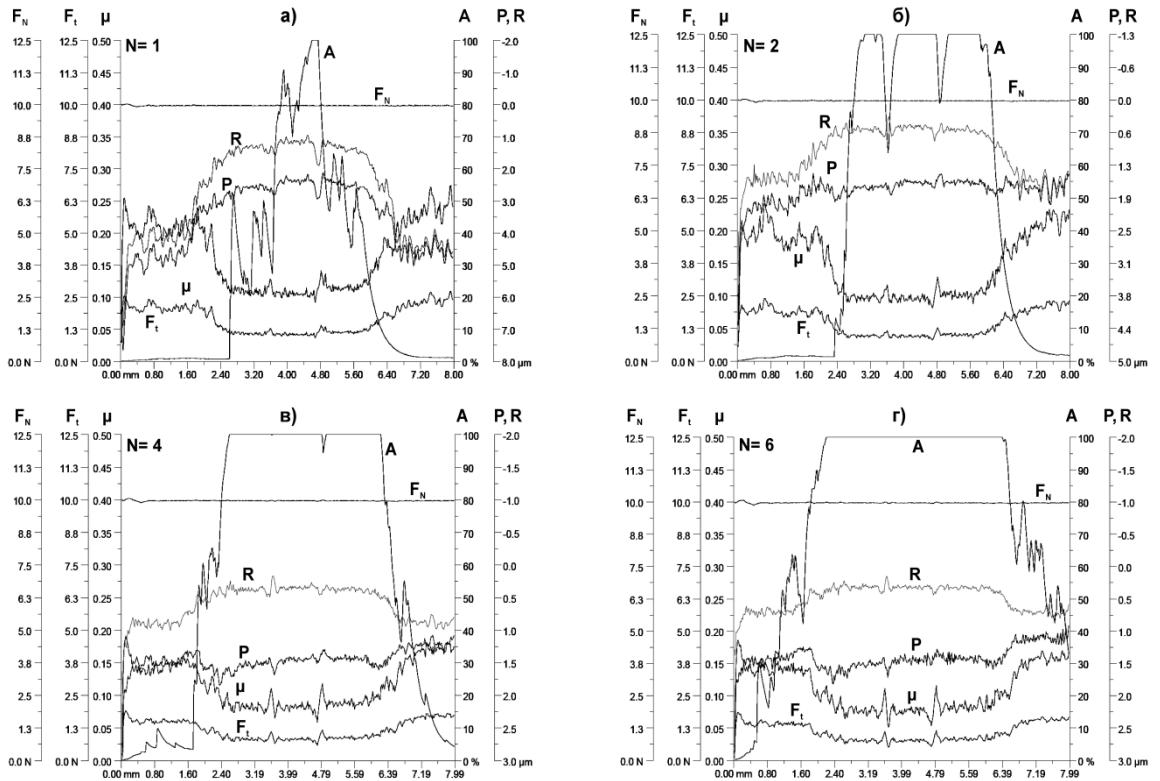


Рис. 2 – Изменение показателей скрэтч-тестирования зоны упрочнения при повышенной скорости трения ($F_N = 10$ Н, $v_s = 30$ мм/мин); а-г –соответственно, номера циклов: N = 1, 2, 4, 6 цикл. Обозначения те же, что и на рис.1

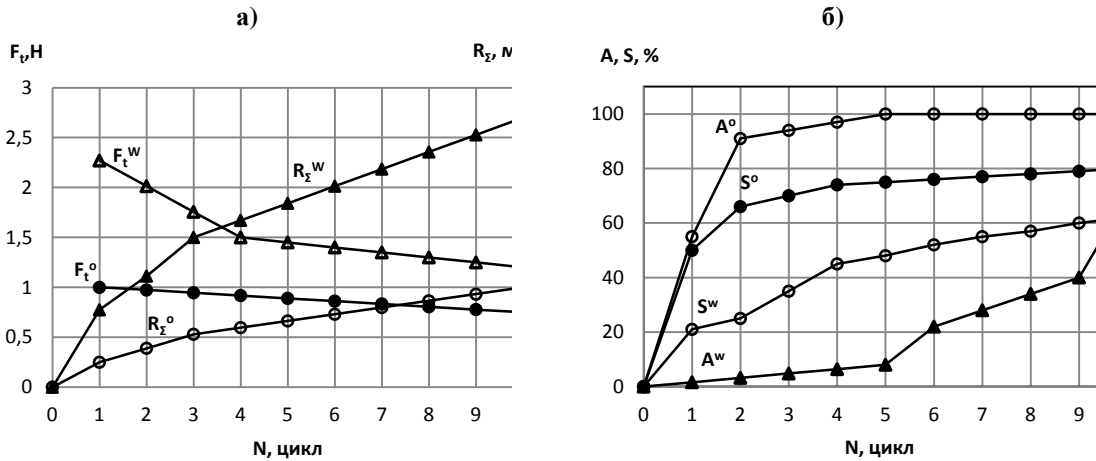


Рис. 3 – Влияние количества циклов повторно-однонаправленного трения ($F_N = 10$ Н, $v_s = 30$ мм/мин) на: а-суммарную остаточную глубину внедрения индентора ($R_{\Sigma}^O, R_{\Sigma}^W$) и силу трения (F_t^O, F_t^W); б-показатели акустической эмиссии (A^O, A^W) и упругого последствия (S^O, S^W) Индексы 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. 3а). 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 контак-

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

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, акустико-эмиссионная активность в этом случае начинает проявляться только со второго цикла нагружения с последующим повышением ее уровня по мере роста числа циклов.

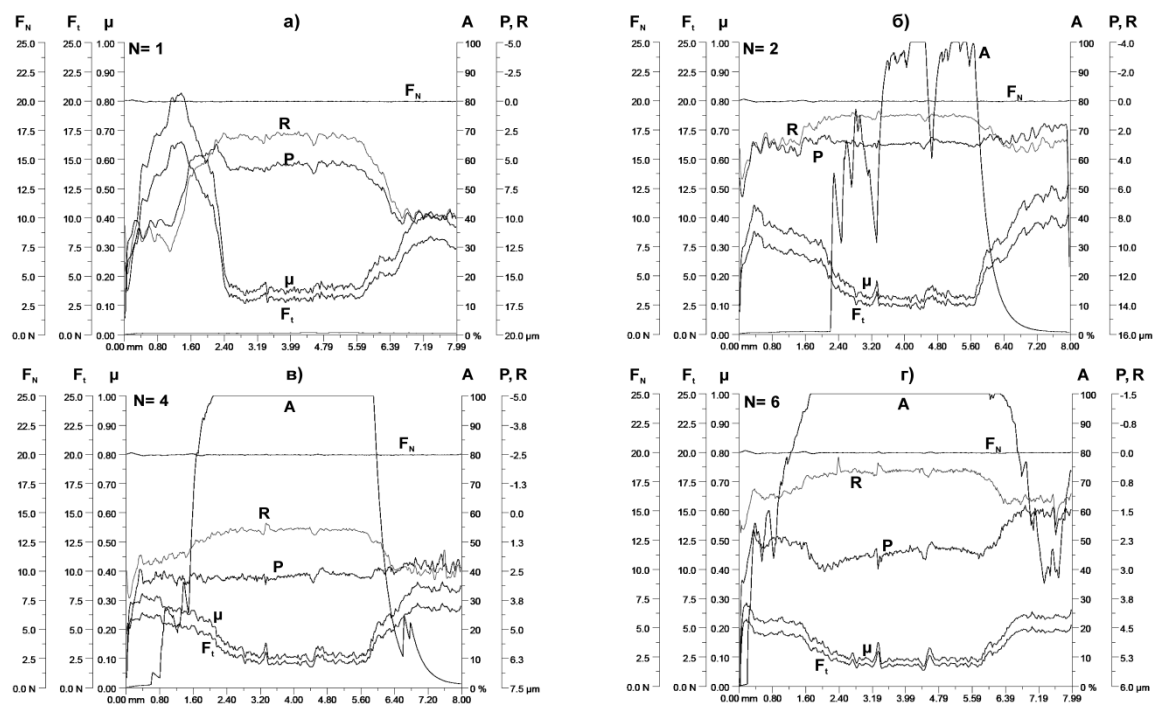


Рис. 4 – Изменение склерометрических показателей зоны упрочнения при повышенной нагрузке трения ($F_N = 20$ Н, $v_s = 30$ мм/мин); а-г – соответственно, номера циклов: N = 1, 2, 4, 6 цикл.

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

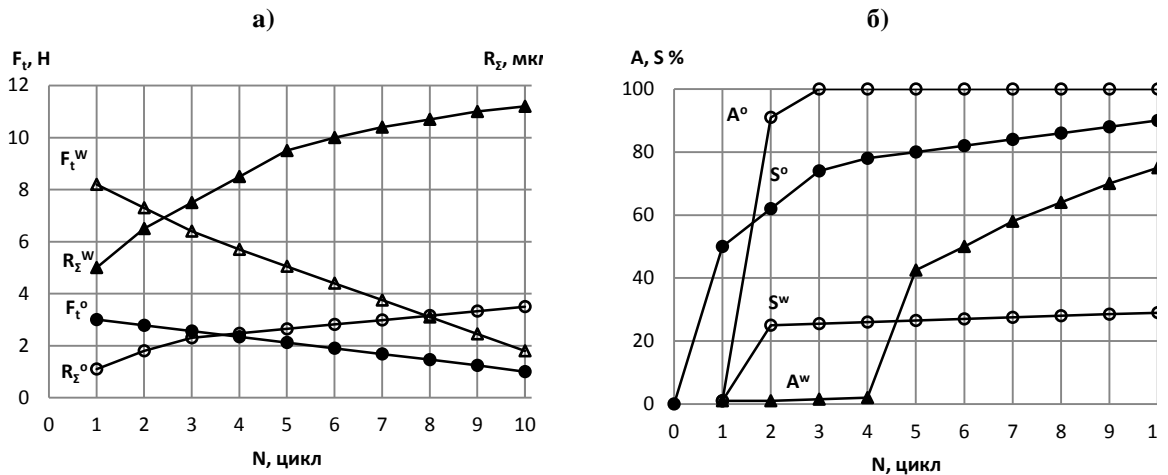


Рис. 5 – Влияние количества циклов повторно-однонаправленного трения ($F_N = 20 \text{ Н}$, $v_S = 30 \text{ мм/мин}$) на:
 а – суммарную остаточную глубину внедрения индентора ($R_{\Sigma}^O, R_{\Sigma}^W$) и силу трения (F_t^O, F_t^W),
 б – показатели упругого последствия (S^O, S^W) и акустической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

Кроме первого цикла нагружения, общие закономерности изменения склерометрических показателей подобны результатам, полученным при $F_N = 10 \text{ Н}$ (см. 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.

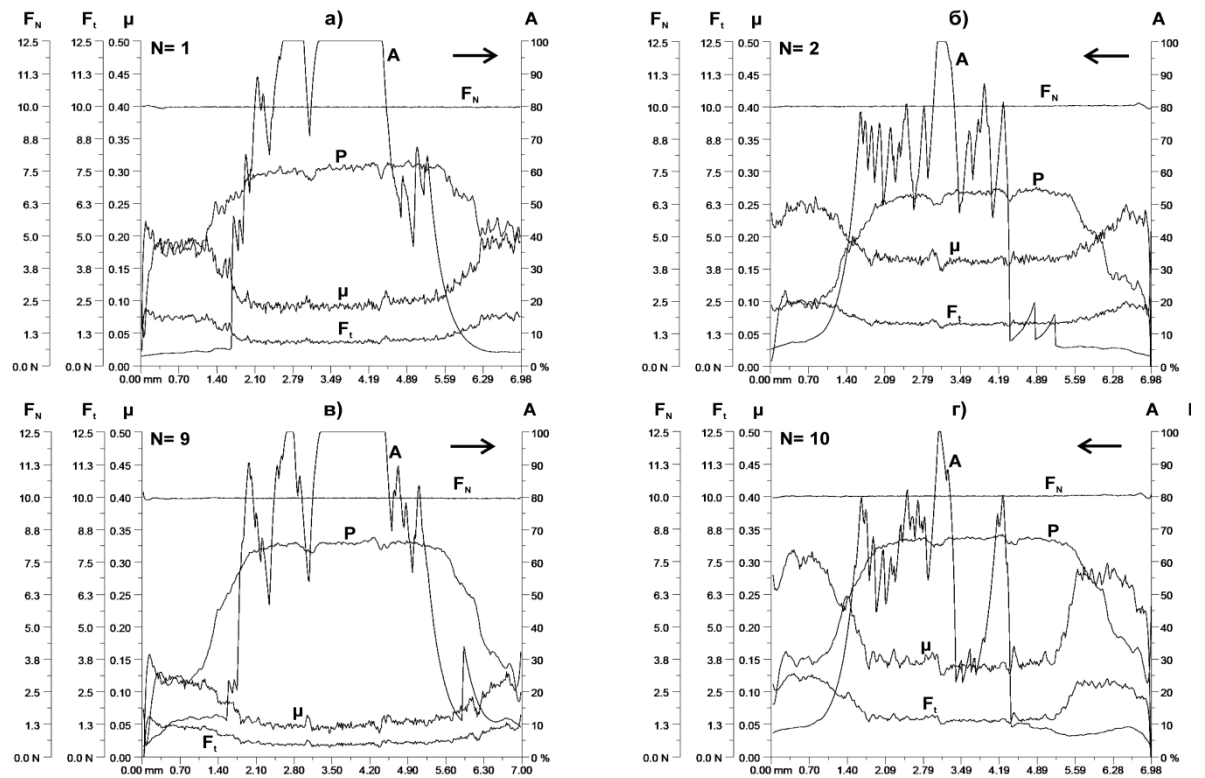


Рис. 6 – Изменение склерометрических показателей зоны упрочнения при циклически-реверсивном трении ($F_N = 10 \text{ Н}$, $v_S = 30 \text{ мм/мин}$); а-г – соответственно, номера циклов: $N = 1, 2, 9, 10$ цикл.

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.

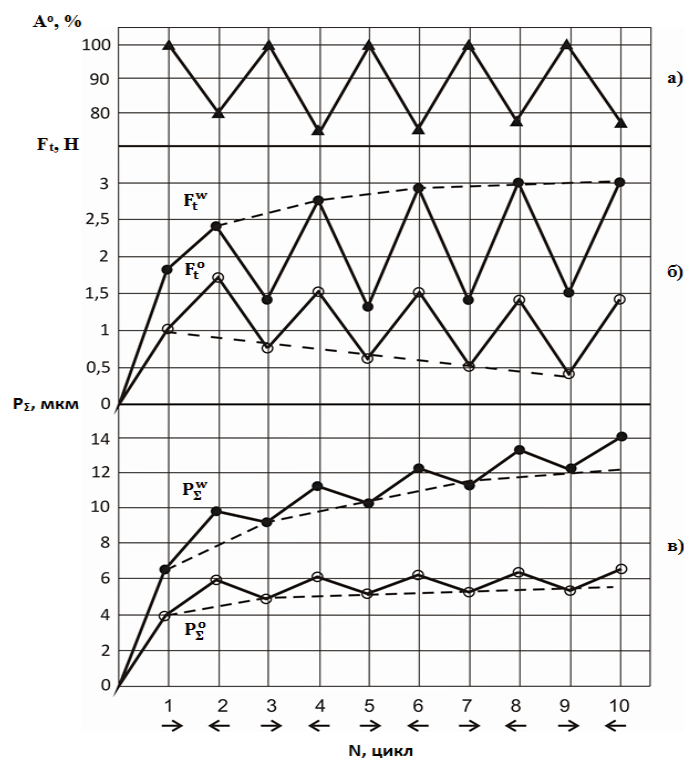


Рис. 7 – Влияние количества циклов реверсивного трения ($F_N = 10$ Н, $v_s = 30$ мм/мин) на:
а – уровень акустической эмиссии (A^0) в зоне упрочнения;
б – силу трения (F_t^O, F_t^W);
в – глубину внедрения индентора в цикле (P^W, P^O)
Индексы W и O отвечают, соответственно, исходному и упрочненному состояниям стали

Из обобщенных данных, приведенных на рис. 7, видно, что в противофазе с сигналами акустической эмиссии в зоне упрочнения (рис. 7а) циклически изменяются сила трения (рис. 7б) и глубина внедрения индентора в цикле (рис. 7в): максимумам силы трения в цикле F_t^O и глубины внедрения индентора P_Σ^O отвечают минимумы показателя акустической эмиссии (A^0). Циклическость изменения силы трения и глубины внедрения индентора характерна и для неупрочненной стали (рис. 7б,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.7б).

Судя по глубине внедрения индентора, упрочненная сталь в среднем имела в 2 раза большую износостойкость по сравнению с исходным состоянием (рис. 7в). 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).

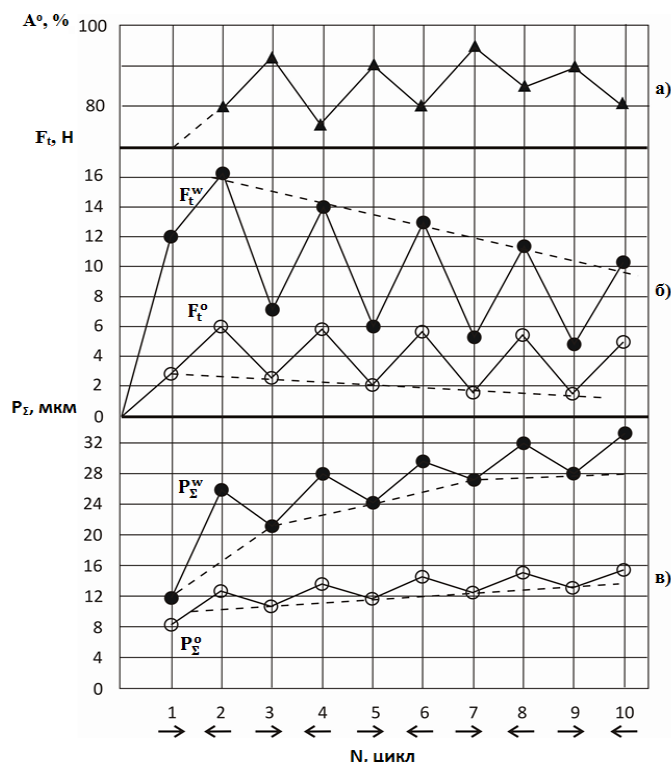


Рис. 8 – Влияние количества циклов реверсивного трения при повышенной контактной нагрузке ($F_N = 20$ Н, $v_s = 30$ мм/мин) на:

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

б – силу трения (F_t^O, F_t^W);

в – глубину внедрения индентора в цикле (P_z^W, P_z^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. 8б). 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 «лес», 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 тре-

ния. 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.

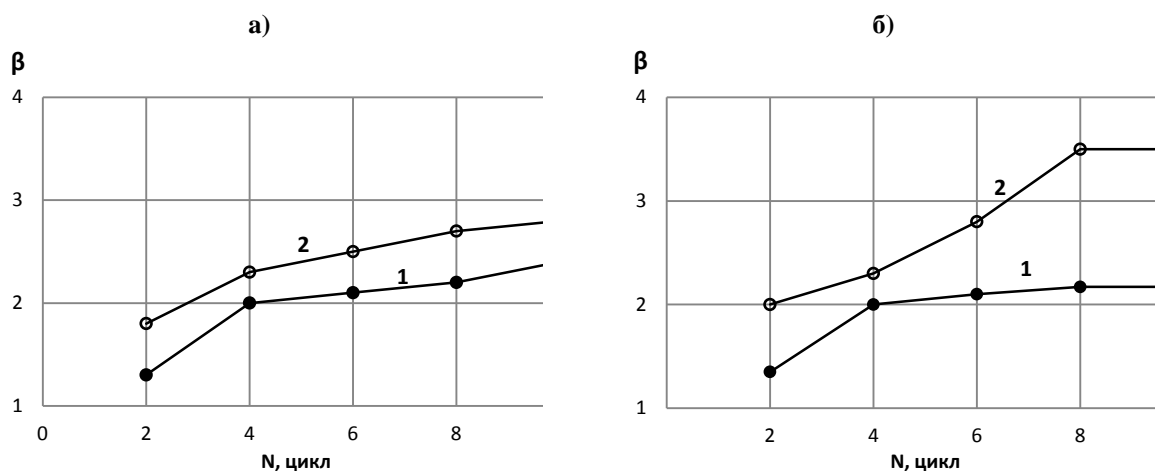


Рис. 9 – Зависимость трибологического показателя эффекта Баушингера от номера обратного цикла реверсивного трения ($v_s = 30$ мм/мин) при $F_N = 10$ Н (а) и $F_N = 20$ Н (б):
1 – исходная структура; 2 – упрочненная структура

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.25б, № 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., Олександренко В.П., Трытек А.С., Соколан Ю.С. Скратч-анализ формирования подповерхностных слоев при трении термообработанной стали // Проблемы трибологии (Problems of Tribology), 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 (Problems of Tribology), 2016, № 1. – С. 6-15.
5. Евдокимов В.Д. Реверсивность трения и качество машин – Киев: 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. // 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.

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.

