

**Соколан Ю.С.**Хмельницкий национальный университет,  
г. Хмельницкий, Украина  
Julia.lila@yandex.ru**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ НА  
ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ СТАЛИ С  
УЧЕТОМ ЕЕ ТЕРМООБРАБОТКИ**

УДК 621.891

Методом амплитудно независимого и амплитудно зависимого внутреннего трения исследованы особенности влияния внешнего трения на процесс естественного старения углеродистой стали после различной термообработки. Установлено, что естественное старение стали сопровождается первоначальным ростом внутреннего трения вследствие развития процессов отжига в стали с последующим снижением уровня внутреннего трения, вызванного блокировкой дислокаций. Показано, что внешнее трение замедляет развитие деформационного старения мартенситных структур, но значительно активизирует этот процесс в случае высокоотпущенной стали на поздних стадиях выдержки.

**Ключевые слова:** внешнее трение, внутреннее трение, декремент колебаний, естественное старение, деформационное старение, закалка, отпуск, дислокации, атомы внедрения, термообработка.

**Введение**

При внешнем трении релаксация контактных напряжений может сопровождаться разупрочнением, неизменностью механических свойств или упрочнением (ростом упругости). Результат зависит от степени стабильности структуры металла и температурно-скоростного режима деформации. При циклическом динамическом нагружении зон фактического контакта процессы релаксации напряжений в металлах тесно связаны с внутренним трением, имея одинаковые механизмы. Поэтому мерой релаксационной способности материала и степени релаксации напряжений может служить уровень внутреннего трения, соответствующий данной амплитуде циклических напряжений и температуре деформации.

Примерами релаксационных процессов при трении стали могут служить релаксация напряжений при динамическом деформационном старении (ДДС) и при отпуске под напряжением – динамическом старении (ДС). В первом случае диффузионная перестройка приводит к упрочнению вследствие блокировки наведенных деформацией свежих дислокаций атмосферами и сегрегациями примесных атомов (углерода и азота). При втором виде старения в метастабильных системах (например, после закалки) в дополнение к ДДС формируется гетерогенная структура с выделением мелкодисперсных избыточных фаз (частиц карбидов и нитридов), затрудняющих вязкое течение (релаксационное упрочнение) [1, 2]. Эффективность развития указанных релаксационных явлений зависит от согласованности процессов диффузии атомов внедрения и дислокационной перестройки, которые, в свою очередь, зависят от скорости деформации и температурного режима. С другой стороны, релаксационное разупрочнение с ростом диссипативной способности может наступить, например, при выделении крупнодисперсных (скоагулированных) частиц избыточной фазы.

Высокая эффективность преобразования подводимой механической энергии в теплоту (до 90%) свидетельствует о тесной связи между внешним и внутренним трением. В зависимости от уровня действующих контактных напряжений процесс диссипации осуществляется различными механизмами амплитуднонезависимого и амплитуднозависимого внутреннего трения, которые одновременно являются механизмами релаксации напряжений. В данной статье изучается изменение релаксационной способности при естественном старении после термообработки стали, а также при деформационном старении после внешнего трения. Анализируются соответствующие механизмы стабилизации структур в процессе старения.

**Методика исследований**

Исследовалась сталь 45 в состоянии закалки (в воду от температуры 850 °С), а также в состоянии низкотемпературного (200 °С) и высокотемпературного (600 °С) отпуска. Образцы подвергались естественному старению непосредственно после термообработки, а также после внешнего трения при температуре 20 °С на протяжении 14 дней с промежуточными измерениями логарифмического декремента колебаний образцов (внутреннего трения). Изменение декремента колебаний исследовалось на установке типа крутильного маятника [3], в области амплитуднонезависимого (АНЗВТ) и амплитуднозависимого (АЗВТ) внутреннего трения.

Триботехнические испытания проводились при контактной нагрузке  $P = 10\text{Н}$  и скорости скольжения  $V = 0,34\text{ м/с}$  на установке, описанной в работе [4]. Путь трения составлял 300 м. Образцы подвер-

гались первоначальной приработке для снятия окислов при той же контактной нагрузке и скорости трения. Путь трения приработке составлял 50 м.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены примеры амплитудных зависимостей внутреннего трения стали после термообработки и разного времени последующей выдержки (естественного старения).

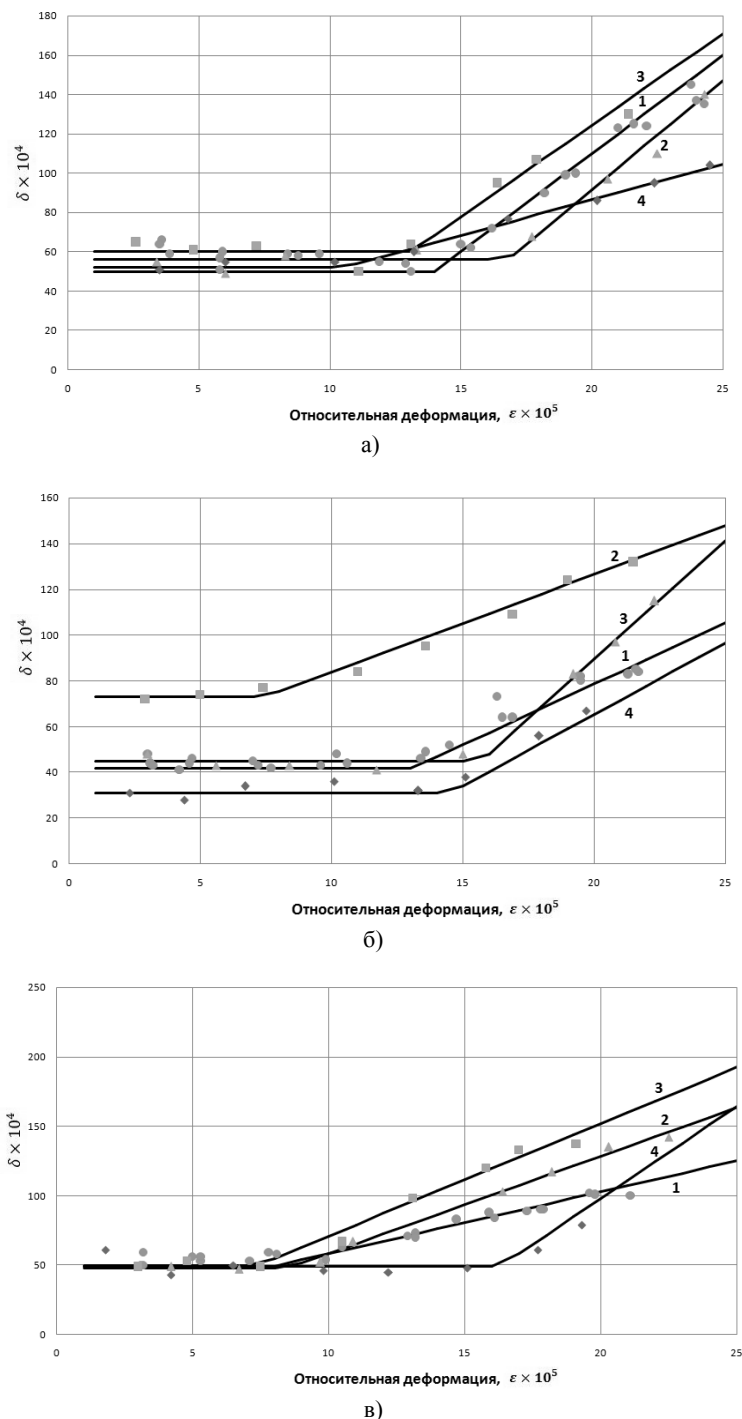


Рис. 1 – Амплитудные зависимости внутреннего трения стали после термообработки и разного времени выдержки:  
 а – закалка;  
 б – отпуск 200°C;  
 в – отпуск 600°C  
 (1 – исходное состояние, 2, 3, 4 – соответственно 2, 4, 9 дней выдержки)

Сталь непосредственно после закалки имеет метастабильную структуру пересыщенного твердого раствора (мартенсит) с большой плотностью малоподвижных дислокаций, сформировавшихся в результате фазового наклепа. Сталь в таком состоянии при высокой твердости имеет значительную микропластичность и относительно низкий модуль упругости.

Отпуск при температуре 200°C вызывает существенное снижение внутреннего трения и рост упругости стали вследствие распада мартенсита с выделением высокодисперсных частиц метастабильного  $\epsilon$ -карбида, когерентно связанного с матрицей (I превращение), а также вследствие распада остаточного аустенита ( $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha + \text{K}$ ) с образованием низкоуглеродистого мартенсита и дисперсных карбидов (II превращение) [5]. Несмотря на то, что часть углерода переходит в карбиды, в тонких двойниках мартенсита сохраняется высокая плотность дислокаций, закрепленных сегрегациями примесных атомов внедрения (C + N) и выделившимися частицами карбидов. Подвижность дислокаций становится минимальной, структура стабилизируется, обретая высокую упругость и релаксационную стойкость.

При температурах отпуска выше 400°C фазовые превращения не происходят, а развиваются процессы коагуляции и последующей сфероидизации карбидов. Пластинчатый феррит преобразуется в зернистый с дроблением блоков мозаики, формируя при  $T_{\text{отп}} = 600^\circ\text{C}$  так называемый сорбит отпуска. При этом плотность подвижных дислокаций уменьшается и внутреннее трение снижается.

Амплитуднонезависимое внутреннее трение (АНЗВТ) соответствует преимущественно потерям, обусловленным колебаниями коротких дислокационных сегментов длиной  $L_c$ , расположенных между ближайшими примесными атомами, локально закрепляющими дислокации (фон внутреннего трения). Рассеяние энергии связано с отставанием по фазе деформаций от приложенных напряжений при периодическом выгибании таких дислокационных сегментов. Деформация, после которой внутреннее трение становится зависящим от ее амплитуды, соответствует началу отрыва дислокаций от примесных атмосфер. В то же время дислокации остаются закрепленными в узлах дислокационной сетки, вызывая потери при колебательном движении отрезков  $L_N$  (дислокационный гистерезис). При дальнейшем увеличении амплитуды деформации дислокации отрываются уже и от узлов сетки дислокаций, образуя дислокационные петли, перемещение которых вызывает микропластическую деформацию. Амплитуднонезависимое внутреннее трение (АЗВТ) несет в себе информацию о дислокационной структуре металлов, взаимодействии дислокаций с примесными атомами, а также о механизмах диссипации механической энергии при циклическом нагружении [6, 7].

На рис. 2 представлены примеры амплитудных зависимостей внутреннего трения термообработанной стали после внешнего трения и разного времени деформационного старения.

Известно [1], что деформационное старение протекает после пластической деформации, если она происходит при температуре ниже температуры рекристаллизации и развивается в течение 15... 16 суток при 20°C или в течение нескольких минут при 200...350°C. При этом происходит упрочнение, что связано, в основном, с ухудшением условий движения дислокаций и образованием карбидных и нитридных фаз (при нагреве). Изменение свойств стали, характерное для деформационного старения, происходит только в том случае, если:

- 1) в металл деформацией введено определенное количество «свежих» дислокаций;
- 2) концентрация примесных атомов, которые могут эффективно взаимодействовать с этими дислокациями, превышает 10-4% (по массе).

Основу механизма деформационного старения составляют процессы взаимодействия примесных атомов с дислокациями, которые введены деформацией. Итогом этого взаимодействия является изменение расположения примесных атомов в объеме металла по сравнению с тем расположением, которое существовало сразу после деформации.

На основании данных рис. 1 и 2 на рис. 3 показано изменение малоамплитудного (амплитуднонезависимого) внутреннего трения термообработанной стали в процессе естественного старения.

Сравнение приведенных на рис. 3 значений декремента колебаний образцов перед началом их выдержки (старения) показывает, что внешнее трение повышает АНЗВТ всех исследуемых структур, полученных после термообработки. По-видимому, это обусловлено ослаблением степени закрепления дислокационных сегментов  $L_c$  вследствие активизации в условиях фрикционного воздействия диффузионной перестройки атомов внедрения (C+N) и их атмосфер.

Естественное старение (без трения) образцов с закалочной и низкоотпущенной структурами сопровождается первоначальным ростом декремента (после 2-4 суток) с последующим его непрерывным снижением (рис. 3 а, б; кривая 1). Внешнее трение формирует более высокий уровень АНЗВТ мартенсита уже на данной стадии деформационного старения (рис. 3 а, кривая 2). Такой же эффект наблюдается для отпущенного мартенсита на более поздних стадиях старения (рис. 3 б, кривая 2).

Естественное старение высокоотпущенной стали ( $T_{\text{отп}} = 600^\circ\text{C}$ ) после термообработки характеризуется непрерывным ростом декремента (рис. 3 в, кривая 1). В то же время после внешнего трения деформационное старение такой стали сопровождается существенным снижением амплитуднонезависимого внутреннего трения (рис. 3 в, кривая 2).

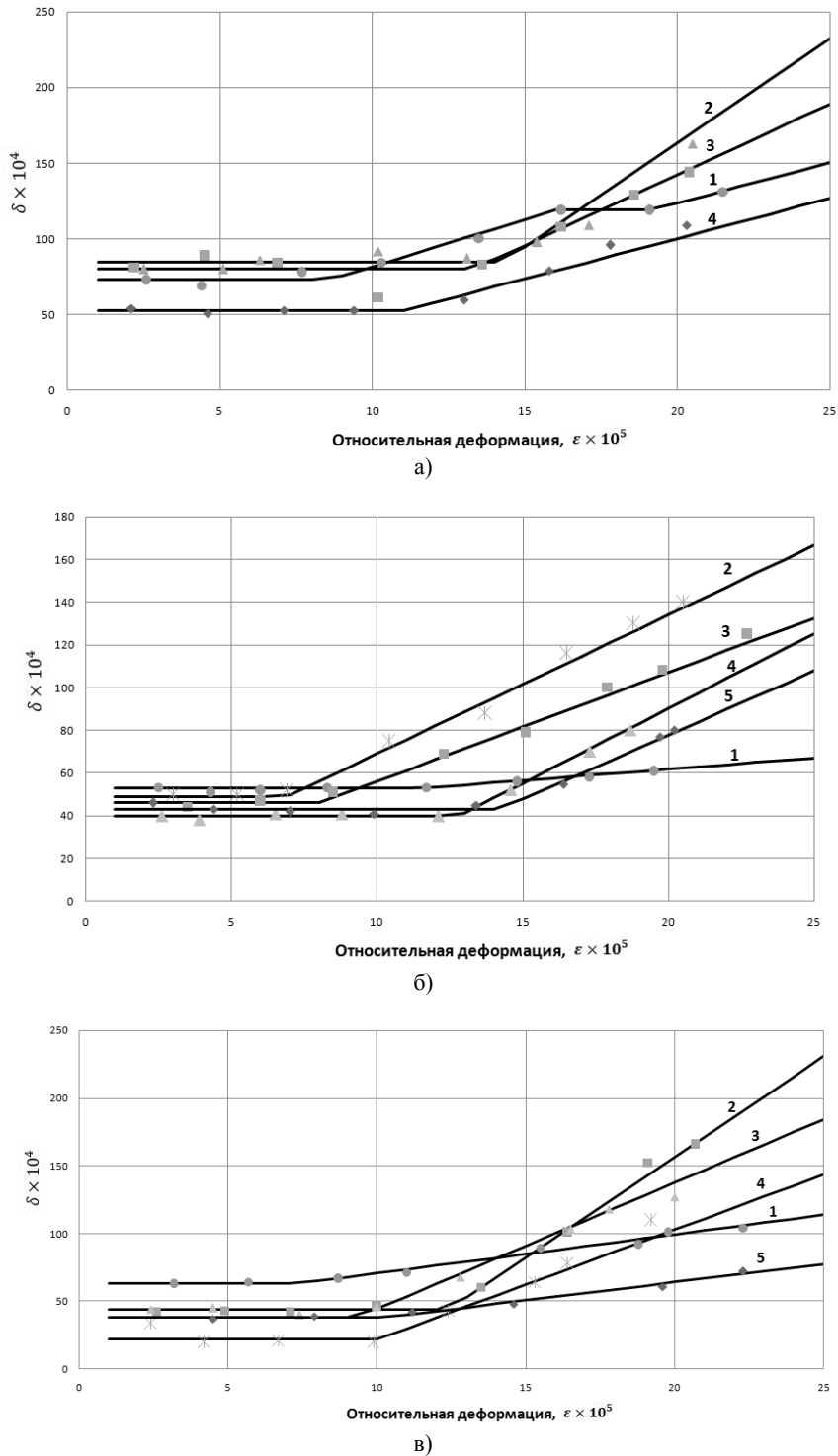


Рис. 2– Амплитудные зависимости внутреннего трения термообработанной стали после внешнего трения и разного времени последующей выдержки:

а – закалка;

б - отпуск 200°C;

в – отпуск 600°C

(1 – исходное состояние, 2, 3, 4, 5 – соответственно 2, 4, 9, 14 дней выдержки)

Высокоотпущенная сталь ( $T_{\text{отп}} = 600^\circ\text{C}$ ) мало склонна к ДДС, поэтому при увеличении плотности дислокаций в используемом скоростном режиме внешнего трения ( $V = 0,34 \text{ м/с}$ ) подвижность дислокаций уменьшается преимущественно вследствие взаимной блокировки, приводящей к снижению вязкости и охрупчиванию (механический наклеп).

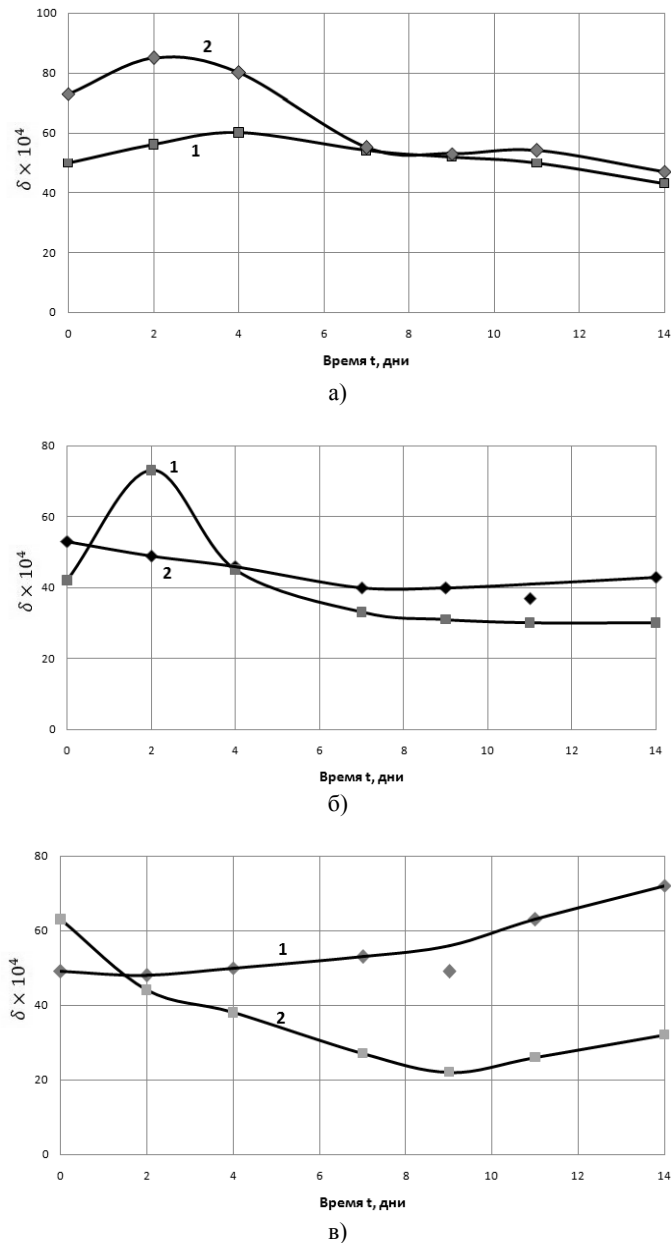


Рис. 3– Изменение АНЗВТ ( $\epsilon = 5 \cdot 10^{-5}$ ) в процессе естественного старения:  
 а – закалка;  
 б – отпуск 200°C;  
 в – отпуск 600°C  
 (1 – после термообработки; 2 – после последующего внешнего трения)

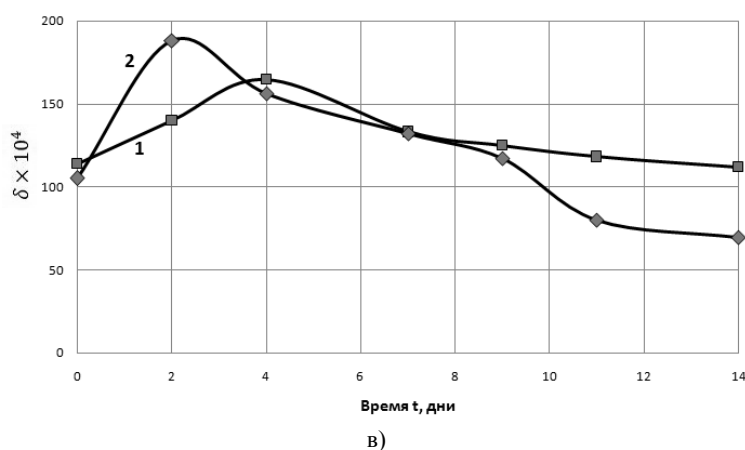
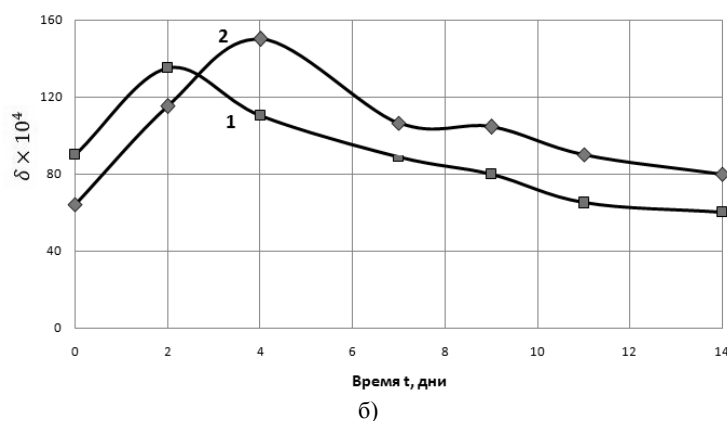
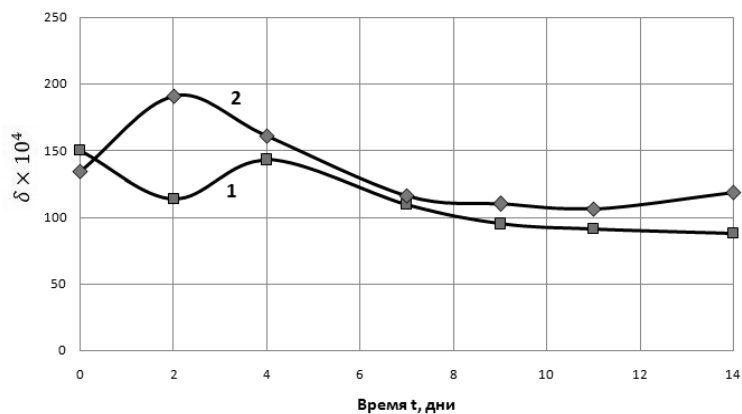
Подобно вышеизложенному, на основании данных рис. 1 и 2, рис. 4 иллюстрирует изменение амплитуднозависимого внутреннего трения (АЗВТ) в процессе старения.

Сравнивая начальные значения декремента для всех исследуемых структур видно, что в отличие от малых амплитуд возбуждения колебаний (см. рис. 3) декремент колебаний в области амплитуднозависимого внутреннего трения после внешнего трения снижается, свидетельствуя о развитии в условиях фрикционного взаимодействия динамического деформационного старения, когда сокращается длина дислокационных отрезков  $L_N$  и увеличивается степень их закрепления в узлах дислокационной сетки.

В то же время повышенная диффузионная подвижность точечных дефектов (атомов внедрения, вакансий, дислоцированных атомов), вызванных внешним трением, на начальном этапе статического старения (выдержка 2-4 часа) приводит к частичной разблокировке дислокаций, что сопровождается ростом АЗВТ как по отношению к исходному значению, так и по отношению к образцам, не подвергавшихся внешнему трению. Эта особенность наиболее характерна для структуры закалки (рис. 4 а).

Для низко- и высокоотпущенных структур (рис. 4 б, в) первоначальная разблокировка дислокаций с ростом уровня АЗВТ наблюдается как при деформационном старении образцов, подвергнутых внешнему трению, так и при естественном старении термообработанных образцов без трения.

Из данных, приведенных на рис. 4 следует, что внешнее трение, существенно не влияя на общий характер изменения декремента в процессе естественного старения стали непосредственно после термообработки, замедляет развитие деформационного старения мартенситных структур (рис. 4 а, б; кривая 2), но значительно активизирует этот процесс в случае стали высокоотпущенной на поздних стадиях выдержки (рис. 4 в, кривая 2).



**Рис. 4.** Изменение АЗВТ ( $\epsilon = 22 \cdot 10^{-5}$ ) в процессе естественного старения:  
 а – закалка;  
 б – отпуск 200°C;  
 в – отпуск 600°C  
 (1 – после термообработки; 2 – после последующего внешнего трения)

Выдержка в течение 2-4 суток после трения способствует развитию процессов отдыха, связанных с десорбцией атомов внедрения в неоднородном поле остаточных напряжений как из межкристал-

литных зон, так и от внутризеренных дефектов кристаллического старения. Это сопровождается снижением вязкости течения границ зерен и уменьшением степени закрепления дислокаций, что проявляется в наблюдаемом первоначальном росте декремента колебаний внутреннего трения непосредственно после испытаний на внешнее трение.

Обычно основными точками закрепления дислокаций являются узлы дислокационной сетки, атомы примесей, дислоцированные атомы и вакансии.

Закалка, формируя метастабильную структуру с высокой концентрацией примесных атомов (С+N) в твердом растворе, способствует усилению эффекта ДДС при трении. При этом ускоряется распад мартенсита и превращение остаточного аустенита с выделением высокодисперсных карбидных частиц. Тем самым вызывается так называемый отпуск под напряжением (динамическое старение), результатом чего является структурная релаксация, обусловленная диффузионным перераспределением атомов примеси с образованием новых фаз [2]. Выделяющиеся при этом частицы карбидов имеют высокую дисперсность и повышенную концентрацию вследствие увеличения числа центров зарождения карбидной фазы. В результате растет сопротивление стали малым пластическим деформациям и повышается релаксационная стойкость как результат релаксации напряжений, возникших в процессе мартенситного превращения.

Трение низкоотпущенной стали ( $T_{отп} = 200^{\circ}\text{C}$ ), имеющей в исходном состоянии высокую упругость и релаксационную стойкость, приводит к суммированию термического упрочнения и динамического деформационного старения, что обуславливает дополнительное повышение релаксационной стойкости (снижение вязкости и диссипативной способности). Таким образом сталь, отпущенная при  $200^{\circ}\text{C}$ , проявляет наименьшую способность к диссипации механической энергии и наибольшую стабильность релаксационных свойств после внешнего трения.

После внешнего трения в приповерхностных слоях металла формируются неоднородные сильно искаженные участки кристаллической решетки, что особенно характерно для границ зерен, состоящих из разупрочненных групп дислоцированных атомов и множества вакансий. В эти несовершенства межкуристаллитного строения внедряются атомы углерода и азота. В результате, из-за структурной неоднородности твердого раствора возникает неравномерное распределение атомов внедрения с формированием так называемых зон внутренней адсорбции с повышенной концентрацией примесных атомов [2]. Внутри зерен также возможно образование зон адсорбции на дефектах кристаллов, однако связывающих атомы внедрения (С+N) менее прочно, чем границы зерен.

## Выводы

1. Под воздействием внешнего трения амплитуднонезависимое внутреннее трение стали повышается, что обуславливается ослаблением степени закрепления дислокационных сегментов из-за активизации в условиях фрикционного воздействия диффузионной перестройки атомов внедрения и их атмосфер.
2. После внешнего трения амплитуднозависимое внутреннее трение снижается, что свидетельствует о развитии в условиях фрикционного взаимодействия динамического деформационного старения, когда сокращается длина дислокационных отрезков и увеличивается степень их закрепления в узлах дислокационной сетки.
3. Естественное старение термообработанных образцов со структурой закалки и низкотемпературного отпуска сопровождается первоначальным ростом амплитуднонезависимого внутреннего трения и последующим его непрерывным снижением. В случае высокоотпущенной стали, естественное старение вызывает непрерывный рост декремента колебаний.
4. Естественное старение стали (после термообработки и после трения) протекает, как правило, в два этапа. Первоначальный рост внутреннего трения обусловлен развитием процессов отдыха, связанных с десорбцией атомов внедрения в неоднородном поле остаточных напряжений, что сопровождается снижением вязкости течения границ зерен и уменьшением степени закрепления дислокаций. На поздних стадиях преобладают процессы блокировки дислокаций, что проявляется в уменьшении декремента, как правило, ниже исходных значений.
5. Внешнее трение существенно не влияет на характер изменения декремента колебаний в процессе естественного старения непосредственно после термообработки. В то же время внешнее трение замедляет развитие деформационного старения мартенситных структур, но значительно активизирует этот процесс в случае высокотемпературного отпуска на поздних стадиях выдержки.

## Литература

1. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. – М.: Metallurgy, 1972. – 320 с.
2. Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г., Каплун Ю.А. Динамическое старение сплавов. М.: Metallurgy, 1985.
3. Шевеля В.В., Трытек А.С., Соколан Ю.С. Влияние термообработки стали на формирование фрикционных связей и их диссипативные свойства // Проблемы трибологии. – 2012. – № 3. – С. 6-14.
4. Шевеля В.В., Соколан Ю.С. Процессы динамического старения стали при внешнем трении // Проблемы трибологии. – 2014. - №3 – С. 6-13.
5. Белоус М.В., Черепин В.Т., Васильев М.А. Превращения при отпуске стали. – М.: Metallurgy, 1973. – 231 с.
6. Криштал М.А., Пигузов Ю.В., Головин С.А. Внутреннее трение в металлах и сплавах. М.: Metallurgy, 1964.
7. Криштал М.А., Головин С.А. Внутреннее трение и структура металлов. М.: Metallurgy, 1976

Надійшла в редакцію 25.11.2014

### Sokolan J.S. Effect of external friction on deformational aging of steel taking into consideration its thermal treatment

Features of external friction effect on the process of natural aging of carbon steel after different thermal treatment was studied by amplitude-dependent and amplitude-independent methods of internal friction. Determined, that natural aging of steel is conducted by primary growth of internal friction as a result of relaxation processes development with further decreasing internal friction level, generated by blocking of dislocations. It is showed, that external friction decelerates development of deformational aging of martensite structures, but considerably activizes this process in the case of high-temperature tempering of steel on late stage of aging.

**Key words:** external friction, internal friction, oscillation decrement, natural aging, deformational aging, hardening, tempering, dislocations, interstitial atoms, thermal treatment/

## References

1. Babich V.K., Gul J.P., Dolzhenkov I.E. Deformational aging of steel. – M.: Metallurgy, 1972. – 320 p.
2. Pastuhova Z.P., Rahshtad A.G., Kaplun J.A. Dynamical aging of alloys. M.: Metallurgy, 1985.
3. Shevelya V.V., Trytek A.C., Sokolan J.S. Influence of steel thermal treatment on formation of frictional connections and their dissipative properties.// Problems of tribology. 2012. №3 P. 6-14.
4. Shevelya V.V., Sokolan J.S. Processes of dynamical aging of steel during external friction.// Problems of tribology. 2014. №3 P. 6-13.
5. Belous M.V., Cherepin V.T., Vasiliev M.A. Transformations during tempering of steel. – M.: Metallurgy, 1973. – 231 p.
6. Krishtal M.A., Piguzov J.V., Golovin S.A. Internal friction in metals and alloys. – M.: Metallurgy, 1964. – 245 p.
7. Krishtal M.A., Golovin S.A. Internal friction and structure of metals. M.: Metallurgy, 1976.