УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Часть 10. Сопротивление малоцикловому деформированию и разрушению в связи с формой цикла и деформационным старением материала

© Александр Никитович Романов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва
alrom37@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрено влияние формы цикла на характеристики деформирования и разрушения стали при высокотемпературном упругопластическом деформировании, обуславливающим активное развитие процессов деформационного старения. Показано, что временные выдержки на максимальных нагрузках в полуциклах, увеличивая время деформирования, могут существенно влиять на процессы накопления повреждения и окончательное разрушение по сравнению с моногармоническим нагружением. При этом временные выдержки и в полуцикле сжатия изменяют кинетику деформационных процессов. Наложение нагрузки второй частоты во время выдержек активизирует процессы деформационного старения, изменяя характеристики циклического деформирования.*
Ключевые слова: *циклическое нагружение, форма цикла, частота нагружения, деформационное старение, карбидные частицы, упругопластическое деформирование, высокие температуры, временные выдержки, длительное статическое нагружение, двухчастотное нагружение, ширина петли гистерезиса, накопление деформаций.*

MATERIALS SCIENCE PROBLEMS IN MECHANICS OF DEFORMATION AND DESTRUCTION AT A STAGE OF CRACKS FORMATION

Part 10. Resistance to low-cyclic deformation and destruction in connection with a form of a cycle and deformation aging of material

A.N. Romanov
IMASH RAS, Russia, Moscow

Abstract. *Influence of a form of a cycle on characteristics of deformation and destruction of steel at high-temperature elasto-plastic deformation, causing active development of processes of deformation aging is considered. It is shown that temporary excerpts on the maximum loadings in 2half-cycles, increasing deformation time, temporary excerpts can significantly influence processes of accumulation of damage and final destruction in comparison with monoharmonious loading thus and in a half-cycle of compression change kinetics of deformation processes. Imposing of loading of the second frequency during excerpts intensifies processes of deformation aging, changing characteristics of cyclic deformation.*
Keywords: *cyclic loading, cycle form, loading frequency, deformation aging, carbide particles, elasto-plastic deformation, high temperatures, temporary excerpts, long static loading, two-frequency loading, hysteresis loop width, accumulation of deformations.*

ВВЕДЕНИЕ. Ранее было показано [1-9], что конструкционные металлические материалы в зависимости от их структурного состояния при циклическом упругопластическом деформировании могут упрочняться, разупрочняться и стабилизироваться с ростом числа циклов нагружения. Один и тот же материал в зависимости от его структурного состояния (вида термообработки) может упрочняться или разупрочняться или стабилизироваться в течение большей доли долговечности. Все металлические материалы на начальной стадии нагружения (не более 10% циклов от долговечности) упрочняются (ширина петли гистерезиса прогрессивно уменьшается при мягком нагружении и увеличивается напряжение при жестком нагружении), а на заключительной стадии предразрушения – разупрочняются (наблюдается активный рост ширины петли гистерезиса вплоть до разрыва образца).

При высоких температурах существенным фактором, сопровождающим процесс деформирования и оказывающим влияние на изменение механических свойств материала, а в связи с этим и на кинетику деформационных характеристик, является деформационное старение, интенсивность протекания которого зависит от уровня циклических деформаций и формы цикла нагружения [11, 13].

1. Влияние формы цикла на сопротивление деформированию и разрушению при малоцикловом нагружении. Исследования проводились при одночастотном, двухчастотном нагружении и нагружении с временными выдержками (5 мин.) с наложением и без наложения нагрузки второй повышенной частоты (с соотношением частот 1:80 и 1:1800) при мягком нагружении (основная частота около 1 цикл/мин, при температуре 650^0C) в условиях растяжения – сжатия. Испытания проводились на стали Х18Н10Т, которая при комнатной температуре являлась циклически стабильным материалом, как было показано ранее [1], а при температуре 650^0C – упрочняющимся вследствие активного деформационного старения.

Как показал эксперимент, в течение первых циклов одночастотного нагружения материал (сталь Х18Н10Т) упрочняется и деформирование сопровождается уменьшением циклической пластической деформации δ_k (рис. 1,а), причем интенсивность упрочнения зависит от уровня действующих напряжений.

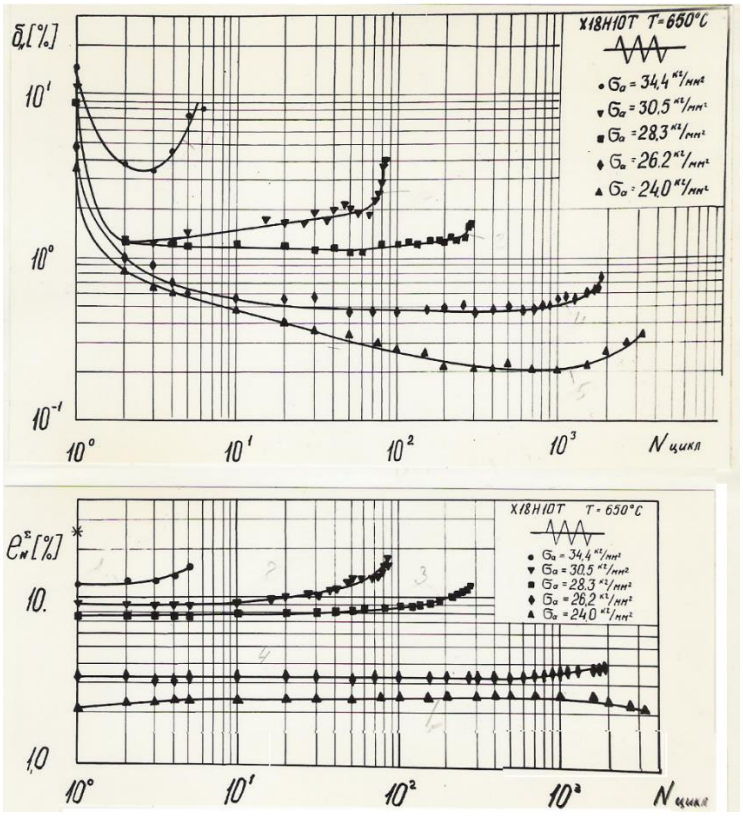


Рис. 1. Изменение циклических деформационных характеристик стали Х18Н10Т при моногармоническом нагружении: а- ширина петли гистерезиса, б – накопленная деформация.

При этом стадия упрочнения при меньших амплитудах действующих напряжений (σ_a =240 МПа) протекает более длительное время, чем при больших напряжениях. С увеличением уровня напряжений (σ_a =300÷340 МПа) стадия разупрочнения (увеличение ширины петли гистерезиса) начинается сразу же после первых циклов нагружения. Характер накопления односторонней деформации в этих условиях практически сохраняется (рис. 1,б), увеличиваясь с ростом амплитуд напряжений (σ_a = 280 МПа) и сохраняясь на уровне исходного значения (в первом цикле) с их уменьшением.

Проведенные испытания при двухчастотном нагружении (соотношение частот 1:80 и 1:18000, σ_a = 60 и 30 МПа по режиму с наложением высокочастотных напряжений на выдержки τ = 5 мин) при экстремальных уровнях нагрузки показали (рис. 2), что изменение деформационных характеристик при двухчастотном нагружении принимает иной характер, чем при одночастотном. Так, величина циклической пластической деформации (рис. 2,а) при одинаковых амплитудах максимальных напряжений существенно больше для двухчастотного нагружения, чем для одночастотного.

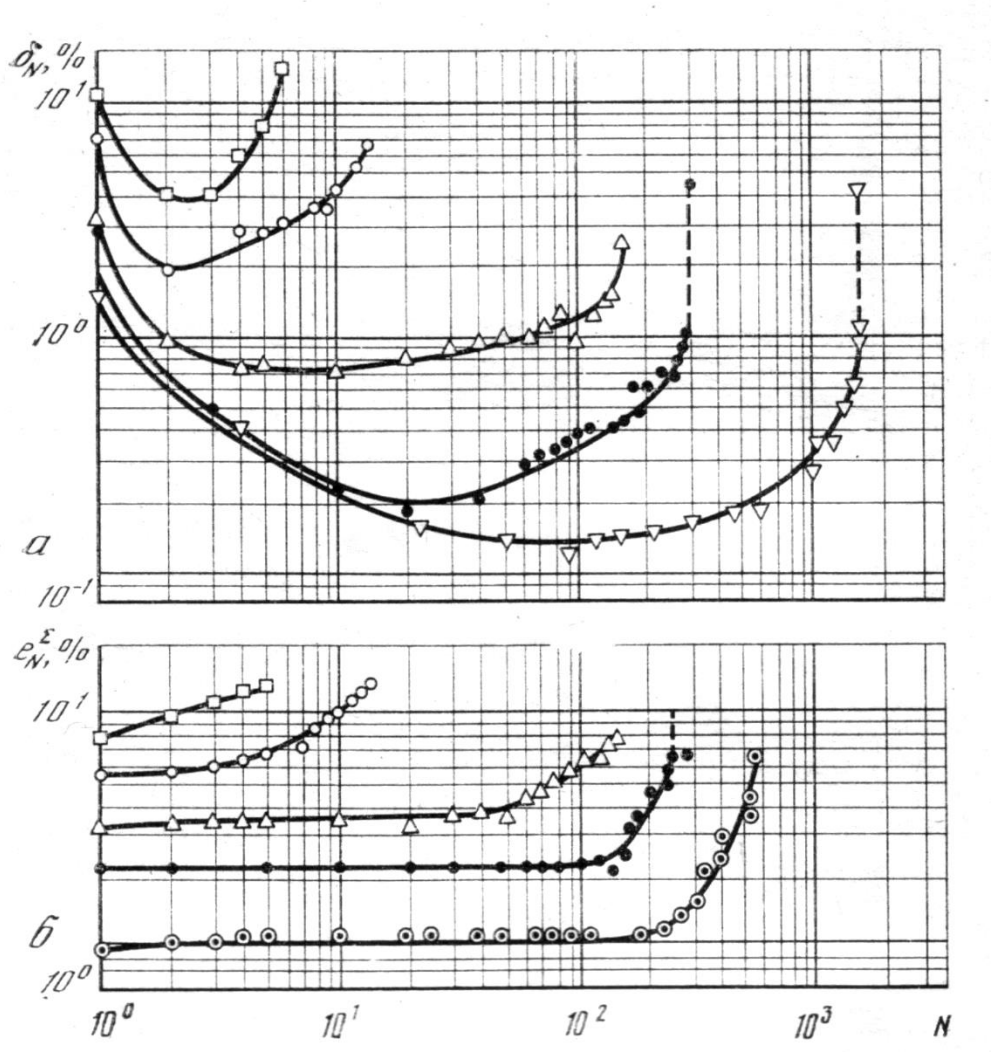


Рис.2, а,б. Изменение циклических деформационных характеристик стали Х18Н10Т при двухчастотном нагружении (τ = 5 мин, σ_2 = 60 МПа, Т=650^{0}С, ω_2/ω_1=80).

Вместе с этим более интенсивно протекает разупрочнение материала после первых циклов нагружения при всех исследованных уровнях действующих напряжений.

Активизируется наряду с этим и одностороннее накопление деформации (рис. 2,б), которое на больших уровнях напряжений (σ_a = 280÷260 МПа) наблюдается начиная с первого

цикла нагружения. При более низких напряжениях (σ_a = 260 МПа) накопление наблюдается при N/N_p = 0,5. Если рассматривать изменение активной составляющей циклической пластической деформации δ_a (рис. 2,в), то видно, что ее изменение подобно изменению циклической пластической деформации при одночастотном нагружении. При этом ан характер изменения полной ширины петли оказывает существенное влияние деформация циклической ползучести e_τ (рис. 2,г), величина которой зависит от уровня σ_a.

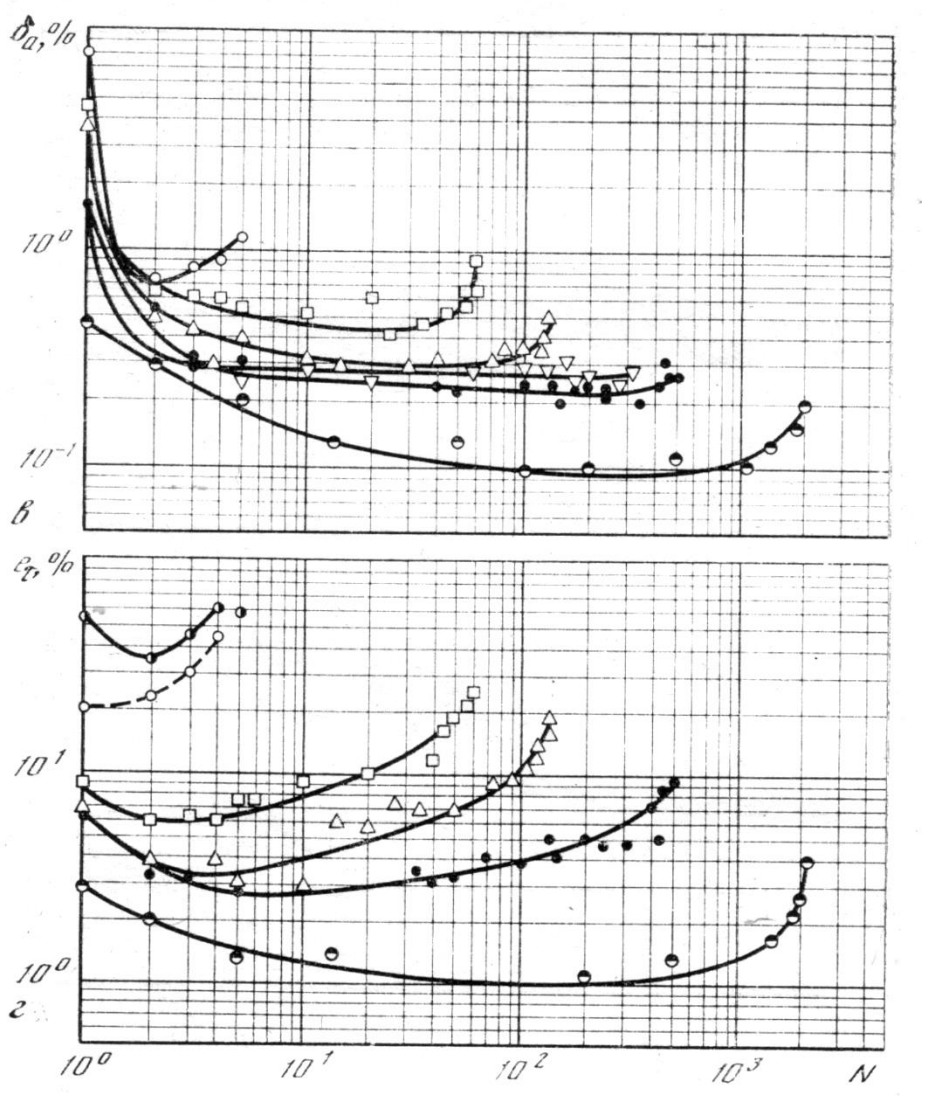
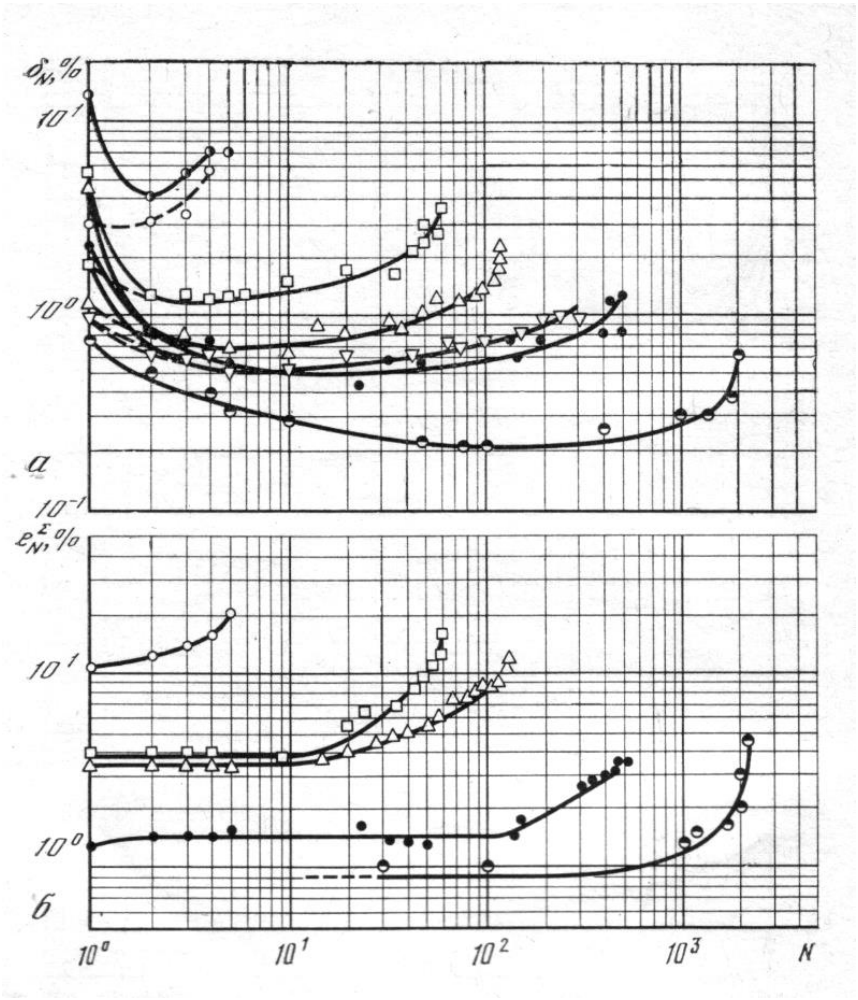


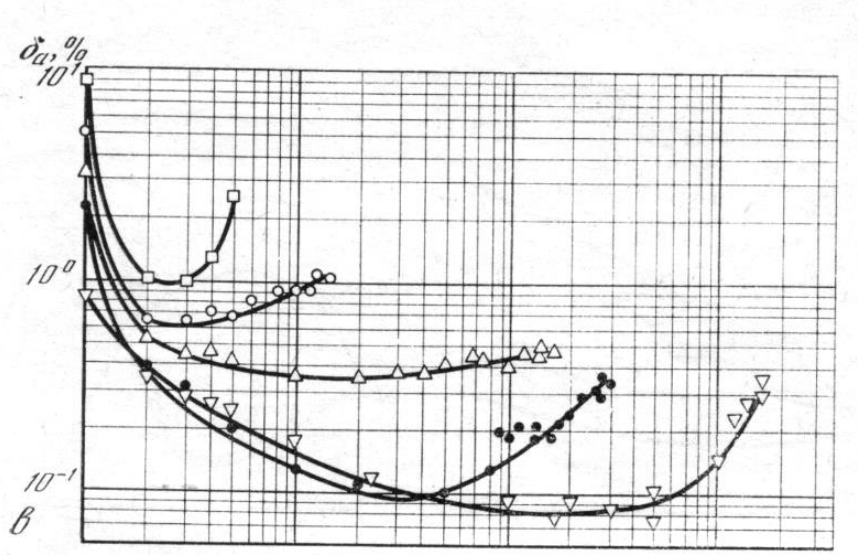
Рис.2,в,г. Изменение циклических деформационных характеристик стали Х18Н10Т при двухчастотном нагружении (τ = 5 мин, σ_2 = 60 МПа, T=650^{0}С, ω_2/ω_1=80).

Как показали испытания с выдержками τ = 5 мин на экстремальных значениях нагрузки (рис. 3), кинетика деформационных характеристик подобна изменениям при двухчастотном нагружении.

Изменение деформационных характеристик материала в данных условиях испытаний, как будет показано ниже, является следствием проявления интенсивно протекающих процессов деформационного старения, которые еще более активизируются при наличии высокочастотной составляющей напряжений в течение временных выдержек (двухчастотный режим). В первую очередь эти процессы проявляются в выделении микродисперсных частиц, количество и размер которых зависят от условий, времени нагружения и уровня нагрузки [13]. Большая плотность и мелкодисперсность частиц обусловливают повышение сопротивления

деформированию материала на определенной стадии нагружения. Дальнейшая коагуляция выпавших частиц и перераспределение их к границам зерен приводят к ослаблению последних, вызывая уменьшение пластичности материала и обусловливая хрупкий характер разрушения.





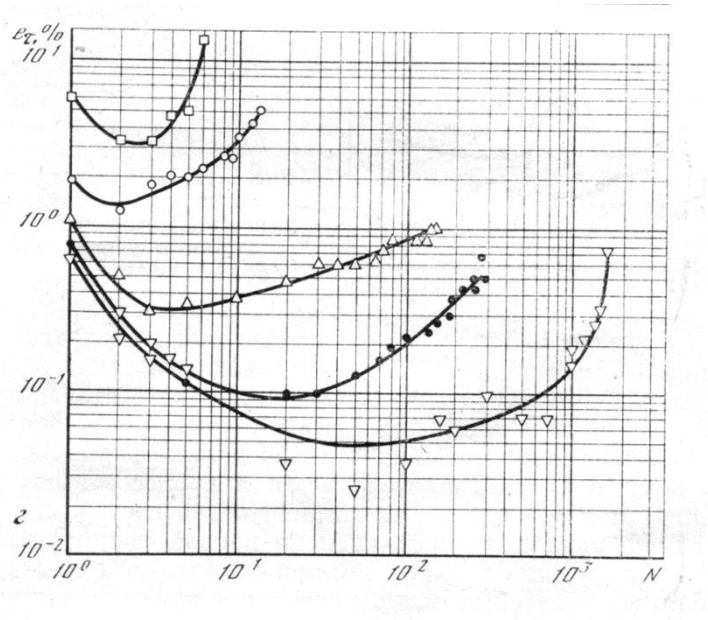
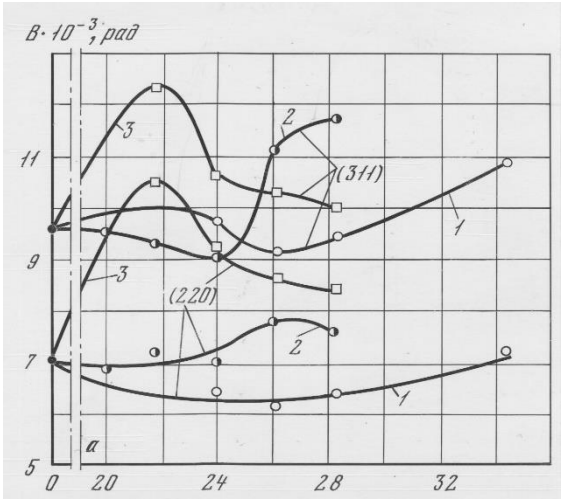


Рис.3. Изменение циклических деформационных характеристик стали Х18Н10Т при нагружении с выдержками (τ = 5 мин, Т=650^{0}С).

2. Структурные изменения при циклическом упругопластическом деформировании стали Х18Н10Т. Как показали наблюдения [11,13], структурные изменения стали Х18Н10Т при высокотемпературном нагружении сопровождаются выделением карбидов и перераспределением легирующих элементов, количество и характер распределения которых зависят от вида и времени нагружения, поскольку последние влияют на развитие диффузионных процессов. Пластическая деформация интенсифицирует диффузионные процессы и тем самым ускоряет выпадение хрупкой фазы, которая влияет на пластические свойства материала и определяет характер его разрушения. Особенность развития структурных изменений определяет характер изменения циклических деформационных характеристик.

При моногармоническом нагружении с амплитудой 340 МПа наблюдается дробление карбидов (рис. 4,б; 5,б и рис 6) и уменьшение их числа (рис. 4,в и 5,в) за счет перехода в раствор.



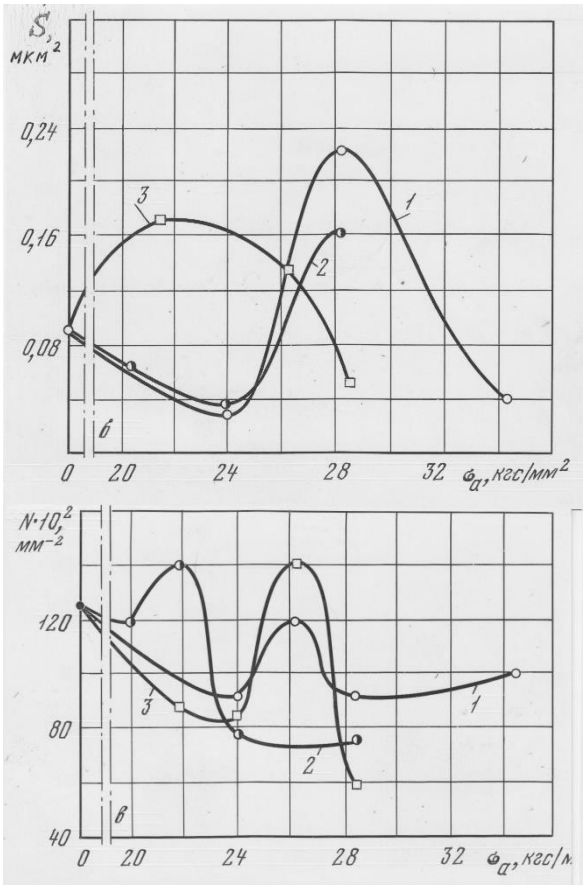
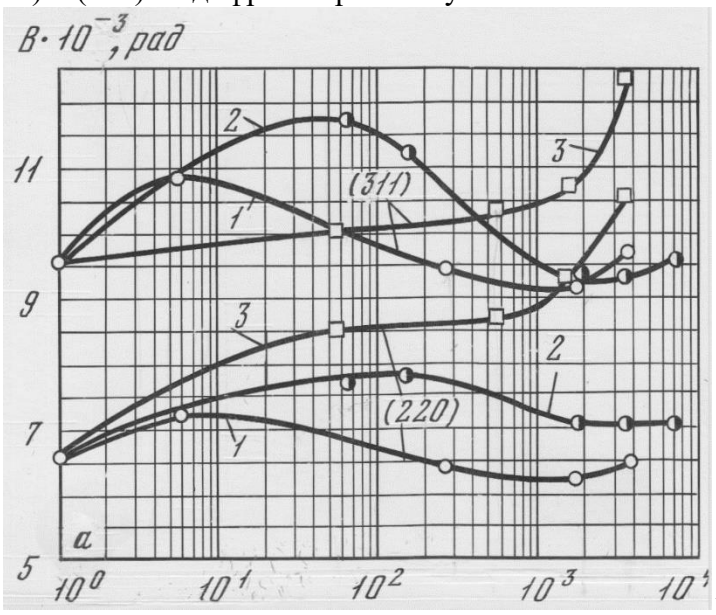


Рис.4. Зависимость степени искажения кристаллической решетки (а),.размера (б) и числа (в) частиц от уровня нагрузки и формы цикла

При этом сильно изменяется степень искажения кристаллической решетки (рис. 4,а и 5,а): ширина линий (311) и (220) на дифрактограммах увеличивается.



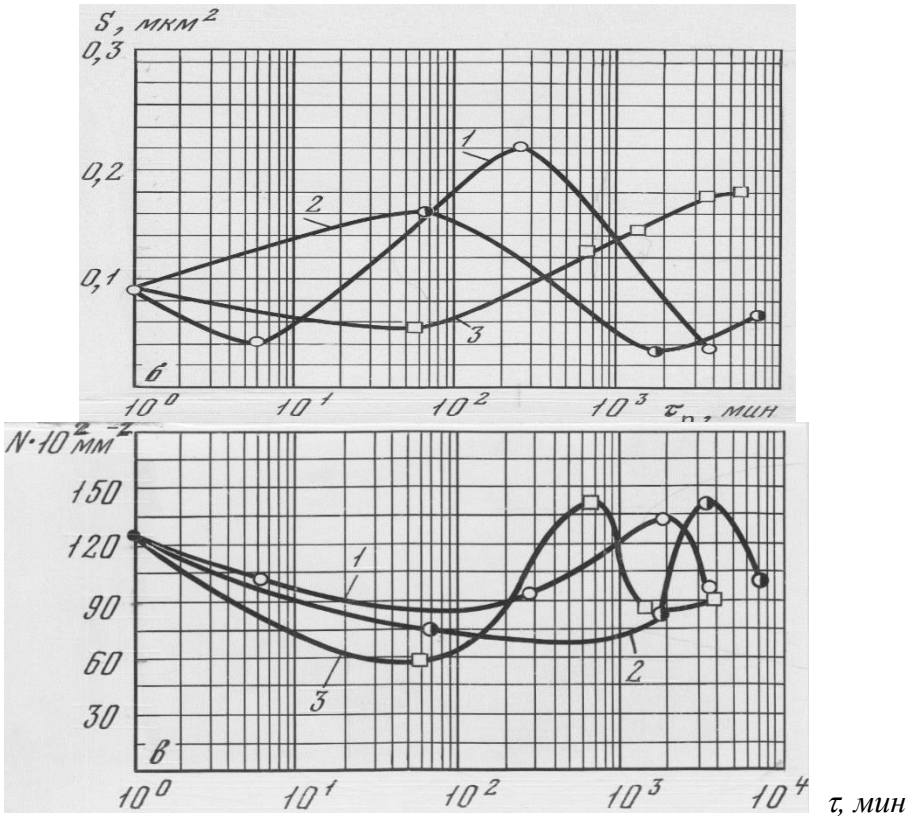


Рис. 5. Зависимость степени искажения кристаллической решетки (а), размера (б) и числа (в) частиц от длительности нагружения и формы цикла.

Однако распределение углерода при этой нагрузке остается вплоть до разрушения сравнительно равномерным как по телу, так и по границам зерен. Снижение амплитуды напряжения до 280 МПа (и тем самым уменьшение времени нагружения) приводит к резкому возрастанию размера частиц (рис. 4,а и 5,а) и незначительному уменьшению их числа. Причем углерод перераспределяется к границам зерен, тем самым охрупчивая их. Фрактографические исследования показывают, что при этом имеет место хрупкий излом, в то время как при σ_a = 340 МПа излом был хрупко-вязким. Дальнейшее понижение амплитуды напряжения до 260 МПа приводит к тому, что размер частиц уменьшается, но возрастает их количество (рис. 4,в и 5,в) за счет выпадения углерода из раствора с образованием карбидов; полуширина рентгеновских линий (311) и (220) уменьшается (рис. 4,а и 5,а). При амплитуде σ_a = 240 МПа наблюдался наименьший размер карбидных частиц.

Нагружение с малыми амплитудами нагрузки (длительные времена) приводит при одночастотном нагружении к дроблению карбидов [13], как и при больших уровнях нагрузки, и к растворению, приводящему к увеличению степени искажения кристаллической решетки с ростом времени нагружения. При этом наблюдался вязкий излом в зоне разрушения.

Следует ожидать, что дальнейшее увеличение времени нагружения (уменьшение нагрузки) приведет к росту размера частиц и охрупчиванию материала. При малых уровнях нагрузки деформационное старение уже в меньшей мере интенсифицируется деформацией, поскольку она мала, и определяется в основном временем нагружения. Однако в этом случае также следует считаться и с влиянием малых деформаций в течение длительного циклического нагружения на развитие деформационного старения.

При нагружениях с выдержками в течение 5 мин на экстремальных значениях нагрузки значительная доля деформации в полуцикле получается за счет ползучести в процессе выдержки, и, например, при σ_a = 240 МПа ширина петли гистерезиса на стадии насыщения после упрочнения на первой стадии деформирования почти в 3 раза больше, чем при

одночастотном нагружении (рис.1 и рис.3). При этом и односторонне накопленная деформация к моменту разрушения существенно превышает деформацию одночастотного нагружения, которая в последнем случае определялась в основном деформацией, накопленной в первом цикле нагружения: если при моногармоническом нагружении предельно накопленная деформация составляла около 3%, то при нагружении с выдержками она была равна 12%. Различие в деформационных характеристиках было обусловлено различием в характере протекания структурных изменений при указанных видах нагружения. Как видно из рис. 4,б; 5,б, при больших уровнях нагрузки при деформировании с выдержками происходит дробление и растворение карбидов: размер и количество карбидных частиц уменьшаются, но при этом увеличивается степень тетрагональности решетки (рис. 4,а и 5,а).

С уменьшением уровня нагрузки до 260 МПа наблюдается рост размера и количества карбидных частиц. Увеличение размера частиц привело к росту микроискажений решетки (рис. 4,а и 5,а). Дальнейшее понижение уровня нагрузки резко снизило количество частиц за счет их коагуляции в частицы больших размеров, которые вызывали сильное искажение кристаллической решетки. Рост размера частиц, как и в случае нагружения без выдержек, вызвал охрупчивание материала, и при σ_a = 240 МПа имел место хрупкий излом, в то время как при σ_a = 280 МПа он был хрупко-вязким. Снижение амплитуды напряжения до 215 МПа сопровождалось еще большим увеличением размера частиц и микронапряжений, вызвавших сильное искажение кристаллической решетки. Однако в последнем случае излом был вязкий, поскольку, хотя размер карбидов и был больше, чем при σ_a = 240 МПа, когда наблюдался хрупкий излом, их расположение было сравнительно равномерным как по телу, так и по границам зерен, в то время как при σ_a = 240 МПа карбиды располагались преимущественно по границам зерен, что и привело к их охрупчиванию.

В случае испытаний с наложением амплитуды нагрузки второй частоты в процессе выдержки происходит сильное разупрочнение материала (увеличение ширины петли гистерезиса) при больших уровнях нагрузки и более сильное – при малых уровнях, чем при нагружении с выдержками без наложения высокочастотной нагрузки (рис. 2). При σ_a = 240 МПа в процессе двухчастотного нагружения упрочнение было даже меньшим, чем при нагружении с выдержками. При малых уровнях нагрузки наряду с сильным упрочнением на начальной стадии деформирования имело место также более интенсивное, чем при нагружении с выдержками, разупрочнение материала (ширина петли гистерезиса увеличивается сильнее). Что касается односторонне накапливаемой деформации, то ее практически не было вплоть до начала развития рассредоточенного трещинообразования. С момента появления первых микротрещин на поверхности образца начинается интенсивное накопление остаточных деформаций (рис. 2).

Как и в случае моногармонического нагружения, при двухчастотном имеется оптимальный уровень нагрузки и времени деформирования, когда размеры карбидных частиц достигают максимального значения (рис. 4 и 5). При низких амплитудах напряжения размер частиц уменьшается, но возрастает их количество. Искажение кристаллической решетки особенно значительно при больших уровнях напряжений, когда велик размер выпадающих карбидных частиц. С уменьшением уровня нагрузки искажение кристаллической решетки сначала падает, а затем с ростом времени нагружения начинает увеличиваться. Максимальное количество частиц наблюдалось при напряжении σ_a = 215 МПа (рис. 4,в и 5,в). После испытания при σ_a = 280 МПа в стали Х18Н10Т была обнаружена большая плотность дислокаций возле мелкодисперсных выделений. Кроме того, имелись крупные выделения карбидов кубической формы размером около 0,3 мкм, распределенные неравномерно. Расчет микродифракционных картин, снятых с выделений, показывает, что эти выделения являются

карбидами *MeC* и $Me_{23}C_6$, имеющими ромбическую решетку с параметрами $a = 2{,}82\dot{A}$, $b = 5{,}52\dot{A}$, $c = 11{,}46\dot{A}$. Понижение амплитуды напряжения до 240 МПа приводит к измельчению карбидов и к их перераспределению. При этом средний размер частиц составлял около 0,02 мкм.

Анализ дисперсных частиц, выявленных в зоне разрушения химическим травлением, показывает, что при меньших амплитудах двухчастотного нагружения стали Х18Н10Т (при 650^0С) образуются более мелкодисперсные выделения, равномерно распределенные по всему объему материала в зоне разрушения.

С помощью микрорентгеноспектрального анализа исследовано также распределение основных карбидообразующих элементов (*C, Ti, Cr* и *Ni*) в образцах стали Х18Н10Т в исходном состоянии и разрушенных образцов. Было установлено, что распределение хрома и железа при рассмотренных режимах и временах нагружения не претерпевает существенных изменений в процессе малоциклового деформирования с наложением нагрузки повышенной частоты с нагревом до 650^0С. Титан при больших амплитудах напряжений перераспределялся в приграничные области, а при малых амплитудах (больших временах нагружения) этот элемент перераспределялся в виде полос.

Таким образом, деформационное старение аустенитной стали Х18Н10Т при повышенной температуре сопровождается выделением и перераспределением легирующих элементов в теле и по границам зерен с образованием карбидов *MeC* и $Me_{23}C_6$. С увеличением длительности нагружения превалирующим является первый тип карбидов. Кроме того, в процессе длительного нагружения происходит выпадение из раствора и коагуляция других легирующих элементов, в особенности титана, который под действием нагрузки и повышенной температуры перераспределяется в виде отдельных полос с повышенной концентрацией титана.

Процесс структурных изменений инициируется, с одной стороны, действием нагрузки (деформации), с другой – температуры. Степень завершенности процессов выпадения частиц в связи с этим определяется временем нагружения и величиной нагрузки (деформации). При больших уровнях деформации протекает интенсивное карбидообразование с коагуляцией частиц по границам зерен. Однако времени, чтобы прошло полное охрупчивание границ, оказывается недостаточно, и в этом случае наблюдается хрупко-вязкий излом. При малых уровнях нагрузки процесс выпадения новой фазы определяется в основном температурно-временными условиями и воздействие деформации оказывается меньшим, чем в первом случае. Времена испытания, которые имели место в данных исследованиях при низких нагрузках, были недостаточны, чтобы полностью завершился процесс коагуляции частиц до критических размеров и плотности, в результате при низких нагрузках, также как и при высоких, наблюдался смешанный тип излома. При средних уровнях напряжений, абсолютная величина которых зависела от формы цикла, как было указано выше, охрупчивание границ было наибольшим и при разрушении имел место хрупкий излом. Частицы при этом были максимального размера (рис. 4 и 5) из всех режимов нагружения для заданной формы цикла.

Выпадение мелкодисперсных частиц вызывает повышение сопротивления деформированию, и на первой стадии нагружения, когда частицы еще малы, наблюдалось сильное уменьшение ширины петли и рост предела текучести [11,13]. Коагуляция частиц, вызывавшая ослабление границ зерен, на некоторой стадии нагружения, зависящее от уровня нагрузки, приводила к возникновению микротрещин по границам зерен, и при измерении деформаций на определенной базе образца получали увеличение ширины петли гистерезиса. Повышение сопротивления деформированию на первых стадиях нагружения связано в основном с блокированием дислокаций выпавшими частицами, эффективность которой

зависит также и от количества частиц. Увеличение размера частиц на последующих стадиях нагружения сопровождается в основном за счет их коагуляции и в связи с этим уменьшением плотности частиц. Последнее обстоятельство облегчает перемещение дислокаций либо за счет их отрыва, либо за счет переползания. В результате на последующих стадиях нагружения уменьшается сопротивление материала малоцикловому деформированию, и это также наряду с ростом доли деструктивной деформации за счет роста поврежденности материала приводит к увеличению ширины петли гистерезиса.

Выпадение и коагуляция карбидных частиц приводят также к изменению исходной пластичности материала. В зависимости от формы цикла, влияющего на скорость протекания диффузионных процессов, изменяется и остаточная пластичность при окончательном разрушении. Причем в зависимости от времени испытания максимальной она оказывается при двухчастотном и длительном статическом нагружениях и минимальной – при одночастотном.

Как известно, сопротивление малоцикловому разрушению определяется пластичностью материала и темпом ее исчерпания [11]. Уменьшение исходной пластичности вследствие деформационного старения приводит поэтому к снижению долговечности при заданном размахе упругопластической деформации в цикле. В тех случаях, когда нагружение осуществляется по заданной нагрузке (мягкое нагружение), темп исчерпания пластичности саморегулируется (ширина петли гистерезиса уменьшается) в связи с ростом сопротивления деформированию при деформационном старении и в результате сопротивления малоцикловому разрушению – повышается. Однако при работе конструкций даже при поддержании заданных силовых параметров рабочих систем (например, давлении) чаще реализуется жесткое нагружение в силу стесненности пластической деформации в местах концентрации напряжений, в вершине дефекта или распространяющейся трещины. В связи с этим, как правило, имеют дело с отрицательными эффектами, вызванными деформационным старением материала в условиях длительного температурно-силового нагружения [11].

Для сопоставления характера развития деформаций при двухчастотном мягком нагружении с наложением высокочастотной составляющей более высокой частоты были проведены испытания с соотношением частот ω_2 / ω_1 = 18000 и формой цикла, аналогичной испытаниям с соотношением частот ω_2 / ω_1 = 80. При этом использовалась установка для высокотемпературных двухчастотных программных испытаний с большим соотношением частот [11]. Трубчатые образцы испытывались при T = 650^{0}С. Время выдержки, в течение которого действовали динамические напряжения σ_{a2} = 60 МПа с частотой ω_2 = 30 Гц, в полуциклах растяжения и сжатия составляло τ = 5 мин. Характер изменения параметров диаграмм циклического деформирования в указанных условиях представлен на рис.6.

Как видно, он в основном подобен изменению соответствующих характеристик при нагружении с меньшим соотношением частот (рис. 2). Как и в последнем случае, полная ширина петли гистерезиса δ после уменьшения в первые циклы нагружения за счет упрочнения материала в дальнейшем стабилизируется, а затем начинает увеличиваться (рис. 6,а), но интенсивность расширения петли в этом случае существенно ниже, чем при нагружении с ω_2 / ω_1 = 80. Активная же составляющая циклической пластической деформации вплоть до разрушения остается на установившемся уровне для всех значений нагрузки. В этой связи увеличение с числом циклов полной ширины петли следует отнести за счет деформации циклической ползучести e_τ, которая также непрерывно увеличивается после начальной стадии нагружения (рис. 6,б).

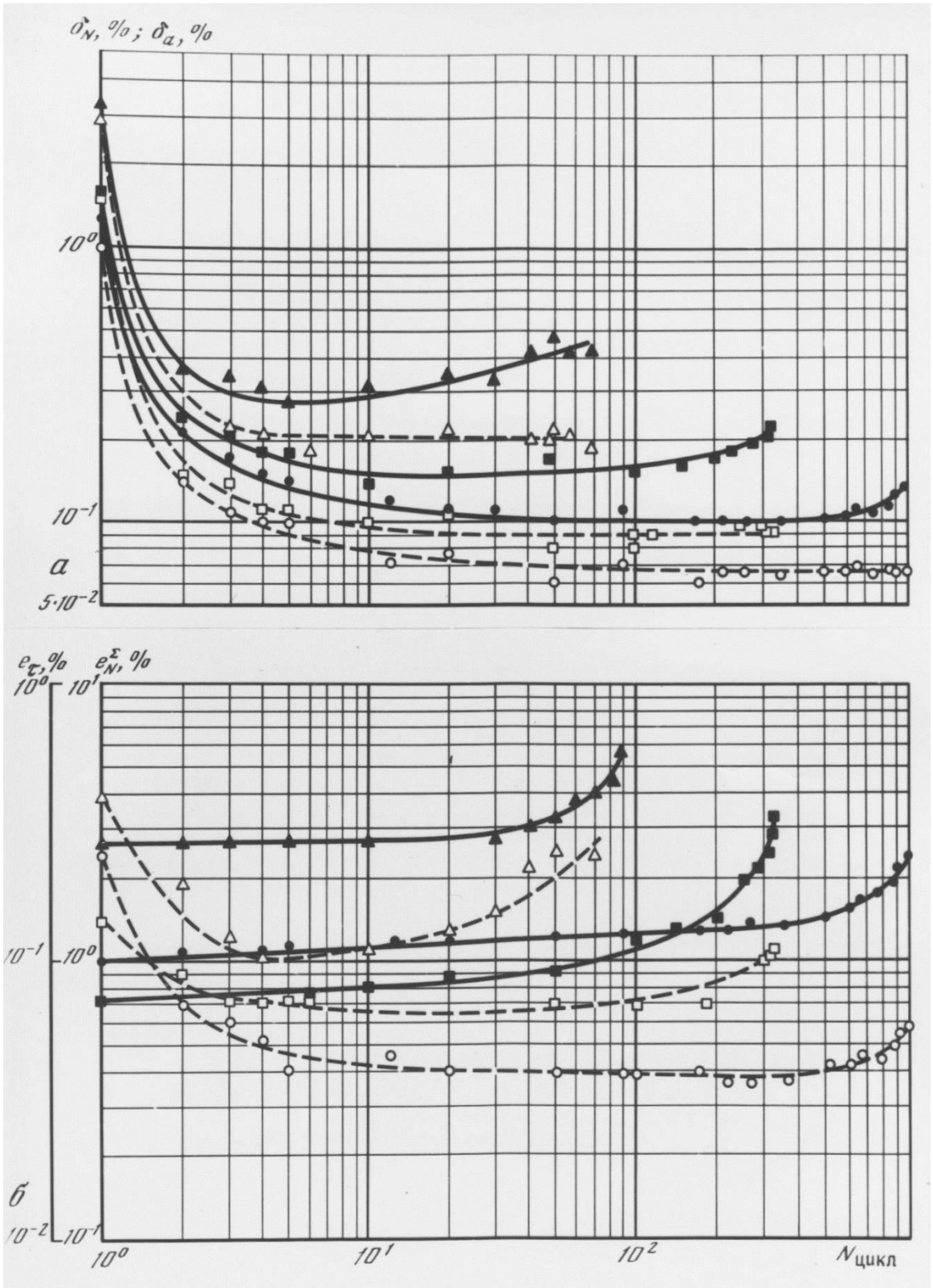


Рис. 6. Изменение циклических деформационных характеристик стали Х18Н10Т при двухчастотном мягком нагружении с большим соотношением частот (ω_2 / ω_1 =18000, $T=650^0C$).

Если сравнивать двухчастотное нагружение с ω_2 / ω_1=18000 и нагружение с трапецеидальной формой цикла, то можно отметить меньшие значения e_τ для случая действия в течение выдержки высокочастотных напряжений (рис.6,б). С уменьшением соотношения

частот до ω_2 / ω_1=80 величина деформации e_τ (рис.2,г) приближается к соответствующей деформации для нагружения с выдержками без наложения высокочастотной составляющей (рис. 3,г), что может быть объяснено увеличением времени пребывания материала на максимальном уровне напряжений с уменьшением соотношения частот. Вместе с тем наблюдаемое увеличение деформации e_τ на заключительной стадии нагружения, обусловливающее расширение полной петли гистерезиса δ, объясняется усталостным повреждением материала от высокочастотной составляющей напряжений, которое увеличивает скорость циклической ползучести и сокращает время до разрушения [11]. Дополнительным усталостным повреждением материала от высокочастотной составляющей объясняется и прогрессирующее с числом циклов нагружения одностороннее накопление пластических деформаций (рис. 6,б), характер которого подобен двухчастотному нагружению с меньшим соотношением частот (рис. 2,б).

Для исследования сопротивления деформированию материала при жестком нагружении были проведены также испытания стали Х18Н10Т при T = 650^{0}С в режимах одночастотного и двухчастотного нагружений без временных выдержек, в которых поддерживались постоянными амплитуды низкочастотной и высокочастотной составляющих деформации. Частота упругопластического низкочастотного нагружения ω_1= 1 ц/мин, а высокочастотного ω_2= 30 Гц, что соответствовало соотношению частот складываемых гармоник ω_2 / ω_1 = 18000. Испытания осуществлялись при одночастотном малоцикловом и двухчастотном нагружениях с наложением высокочастотной деформации e_{a2} = 0,025% (амплитуда высокочастотных напряжений σ_{a2} = 30 МПа), а также e_{a2} = 0,045% (σ_{a2} = 60 МПа).

Кривые изменения максимальных напряжений $\sigma_{a\max}$ и ширины петли пластического гистерезиса δ в процессе нагружения для данных режимов приведены на рис. 7.

При одночастотном нагружении с заданной амплитудой максимальной упругопластической деформации $e_{a\max}$, как видно из рис. 7,а, на начальной стадии (до $N / N_p \approx 0{,}15$) происходит интенсивное упрочнение материала, выражающееся в повышении амплитуды напряжений в циклах и уменьшении циклической пластической деформации δ, а затем наступает стадия их стабилизации, продолжающаяся вплоть до появления микротрещины размером 2-3 мм, когда начинается резкое падение нагрузки. Из полученных данных следует, что сопротивление деформированию стали Х18Н10Т при жестком одночастотном нагружении и T = 650^{0}С, характеризуемое в первую очередь кинетикой циклической пластической деформации, на начальной стадии подобно мягкому нагружению материала в аналогичных условиях.

С увеличением доли относительной долговечности наблюдается некоторое их различие, выражающееся в увеличении при мягком нагружении величины δ (переход материала к разупрочнению), что связано, по-видимому, с наличием квазистатического повреждения, которое отсутствует при жестком нагружении, когда δ после стабилизации остается постоянной.

Наложением на низкочастотную упругопластическую деформацию высокочастотных колебаний e_{a2} = 0,025% (что составляет 5-8% от максимальной амплитуды деформаций или по напряжениям 11-13% от их максимальной величины на стадии стабилизированного нагружения) приводит к увеличению степени упрочнения материала, отражающегося на повышении амплитуд максимальных напряжений (рис. 7,б), по сравнению с одночастотным нагружением (рис. 7,а) при одинаковых размахах максимальной деформации.

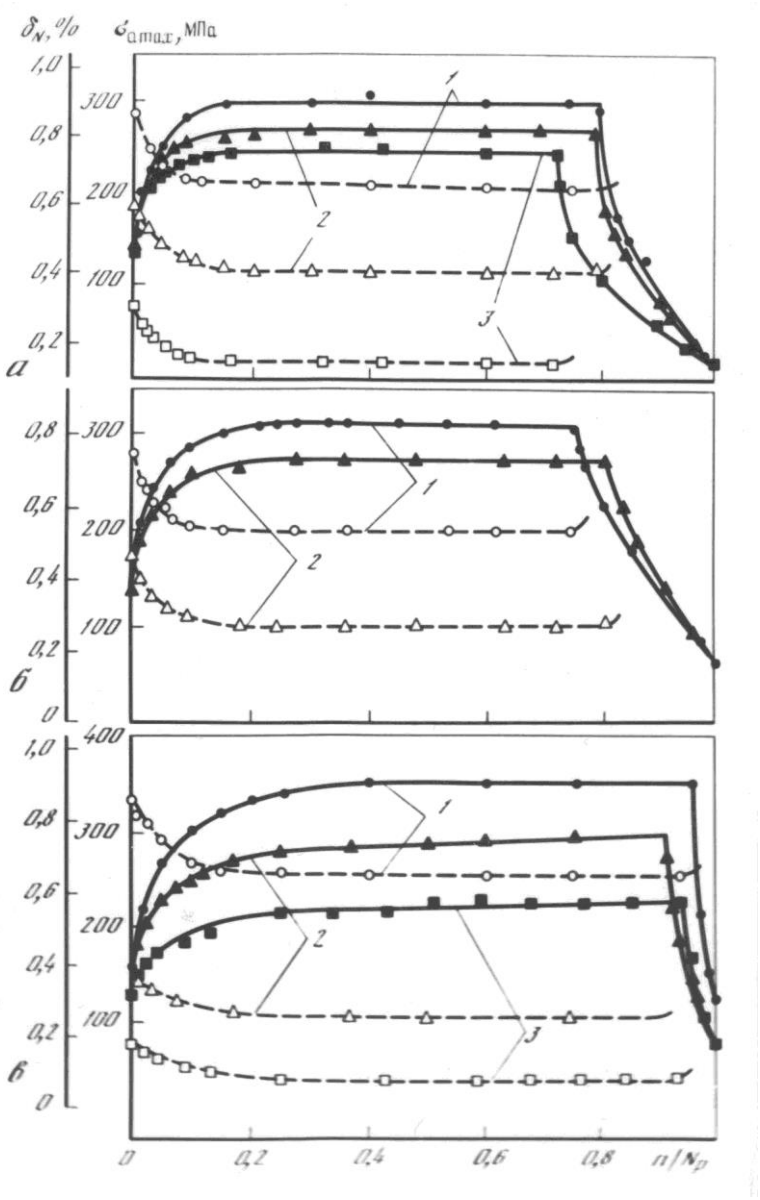


Рис.7. Изменение ширины петли и напряжений при жестком одночастотном (а) и двухчастотном (б) нагружении стали Х18Н10Т при 650^0 С.

Вместе с этим, как видно из рис. 7,б, при действии высокочастотной составляющей увеличивается и продолжительность стадии исходного упрочнения, которая в этом случае составляет величину $N/N_p \approx 0{,}25$, а также происходит сокращение периода развития усталостной трещины до 0,25 – 0,15 от общей долговечности. Увеличение амплитуды высокочастотной деформации до e_{a2} = 0,045% (8-25% от $e_{a\max}$ и 18-20% от $\sigma_{a\max}$) еще больше сокращает период развития макротрещины до значений 0,1 – 0,05 от N_p (рис. 7,в). Кроме того, от величины e_{a2} оказывается зависящим и период исходного упрочнения, который при e_{a2} = 0,045% возрастает до $N/N_p = 0{,}3 \div 0{,}4$ (рис. 7,б).

Таким образом, сопротивление циклическому упругопластическому деформированию аустенитной нержавеющей стали Х18Н10Т при температуре T = 650^{0}С, соответствующей интенсивному протеканию в ней процессов деформационного старения и других температурно-временных дефектов, существенным образом зависит от условий испытаний, к которым в первую очередь относятся уровень циклических деформаций и форма цикла

(частота) нагружения. Эти характеристики в значительной мере определяют интенсивность деформационного старения материала, а тем самым и характер изменения деформационных характеристик, на основе которых описываются процессы накопления повреждений. Учет изменения механических свойств материала вследствие его структурных изменений, а также особенностей развития деформаций в зависимости от формы цикла нагружения позволяет достаточно правильно описывать накопление повреждений и определять в соответствии с этим расчетное число циклов до разрушения.

Ранее было показано [8, 10] что условия нагружения (форма цикла, частота, температура) влияют на циклические и статические деформационные свойства материалов, а правило суммирования всегда остается одним и тем же: в случае отсутствия значительных структурных изменений накопленное повреждение (или долговечность) может быть оценено по зависимостям (1) и (2) соответственно для жесткого и мягкого нагружения:

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta e}{\varepsilon^2} dN = 1, \qquad (1)$$

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta e}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN = 1, \qquad (2)$$

где $\Delta\varepsilon$ - односторонне накопленная за цикл деформация, δ – ширина петли в полуциклах растяжения, ε - предельная деформация при статическом разрыве образца, N_p - разрушающее число циклов, упругопластическая деформация $e = \delta + e_y$, e_y - упругая деформация в полуцикле растяжения при разгрузке.

При интенсивном протекании структурных изменений (деформационное старение, рекристаллизация, фазовые и аллотропические превращения и т.д.) в зависимости (1) и (2) должны быть введены поправки во временной трактовке в виде сомножителей $\sigma_p / \sigma_p^{\text{ст}}$ и ν^{κ}:

$$\int_0^{\tau_p} \frac{\sigma_p}{\sigma_p^{\text{ст}}} \nu^k \left[\frac{\delta\ e}{\varepsilon^2} \right] d\tau = 1, \qquad (3)$$

$$\int_0^{\tau_p} \frac{\sigma_p}{\sigma_p^{\text{ст}}} \nu^k \left[\frac{\delta e}{\varepsilon^2} + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \right] d\tau = 1, \qquad (4)$$

где τ_p – время до разрушения, ν - частота нпгружения определяемое как $\tau_p = N_p / \nu$; k– коэффициент, учитывающий эквивалентную длительность непрерывного действия максимального напряжения в циклах нагружения.

Таким образом, при циклическом деформировании в условиях интенсивно протекающих структурных изменений, зависящих от частоты нагружения, кинетика накопления повреждений и предельное состояние (образование трещины) может быть описано на основе использования деформационно-кинетического критерия (2) во временной трактовке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1 // Вестник научно-технического развития, 2013, №11, с.38-49.

2. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 2. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование // Вестник научно-технического развития, 2014, №1, с.37-54.

3. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 3. Микроструктурные особенности развития деформаций в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур транскристаллитного разрушения // Вестник научно-технического развития, 2014, № 2, **с.**36-50.
4. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 4. Основные типы микроструктурных деформационных рельефов, образующихся в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур интеркристаллитного разрушения // Вестник научно-технического развития, 2014, №3, с.31-58.
5. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 5. Энергия статического и циклического разрушения конструкционных металлических материалов // Вестник научно-технического развития. 2014, №9, с.10-30.
6. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 6. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути пластической деформации при малоцикловом нагружении конструкционных материалов // Вестник научно-технического развития, 2015, № 3, с. 32-41.
7. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 7. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении // Вестник научно-технического развития, № 5, 2015, с.15-24.
8. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 8. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути упругой деформации при усталостном нагружении конструкционных материалов // Вестник научно-технического развития, 2015, № 6, с.31-39._
9. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 9. Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов. Вестник научно-технического развития, 2015. № 12,
10. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения // Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35 с.
11. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М., Наука. 1988, 280 с. Вестник научно-технического развития,
12. Романов А.Н., Гаденин М.М. Исследование процесса деформирования при малоцикловом нагружении // Проблемы прочности. 1971, № 11, с. 13.
13. Лозинский М.Г., Романов А.Н., Малов В.В. Структурные изменения аустенитной стали в связи с условиями малоциклового нагружения. Практика тепловой микроскопии. М.: Наука, 1976, с. 67-72.

Дата поступления статьи: 15 февраля 2015 года.