

PACS: 81.40.Jj, 81.30.Kf

С.В. Гладковский¹, Д.И. Вичужанин¹, С.В. Смирнов¹, Т.П. Богданова²,
Б.М. Эфрос³

ЭФФЕКТЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВОВ С МЕТАСТАБИЛЬНЫМ АУСТЕНИТОМ

¹Институт машиноведения УрО РАН
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620219, Россия

²Уральский государственный технический университет – УПИ
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

³Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2008 года

Изучено влияние циклического нагружения в малоцикловой области на форму петли механического гистерезиса сплавов с метастабильным аустенитом. Выявлены особенности механического поведения на примере сплавов С1Т и ЭП678 при циклическом нагружении, связанные с проявлением структурной неустойчивости, а также изменение кинетики образования α' -мартенсита деформации в зависимости от амплитуды цикла и характера приложения нагрузки.

Введение

В зависимости от механического поведения при циклическом нагружении все конструкционные материалы можно разделить на следующие группы: циклически упрочняемые, разупрочняемые и нейтральные. В широко используемых на практике сплавах со структурой метастабильного аустенита наряду с химическим и исходным фазовым составом существенное влияние на процессы деформирования при циклических испытаниях оказывают протекающие при упругопластическом нагружении деформационные $\gamma \rightarrow \varepsilon$ - и $\gamma, \varepsilon \rightarrow \alpha'$ -мартенситные превращения. В связи с этим в настоящей работе изучено влияние различных схем нагружения на эффекты циклического упрочнения/разупрочнения и исследовано изменение фазового состава в процессе деформирования сплавов с метастабильным аустенитом.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования были использованы сплавы С1Т (двухфазный ($\gamma + \varepsilon$)-сплав 05Г20С2Т с метастабильным аустенитом) и

ЭП678 (мартенситностареющий сплав 03X11H10M2T промышленной выплавки). Сплав С1Т, содержащий в структуре 55% ε -мартенсита, изучали в состоянии после закалки от 1050°C. Сплав ЭП678 после закалки от 920°C имел мартенситную структуру, а его старение в интервале температур 500–660°C с выдержкой 3 h сопровождалось выделением упрочняющих интерметаллидных частиц различного состава и морфологического типа [1]. Кроме того, с увеличением температуры старения свыше 560°C в структуре сплава ЭП678 в результате развития обратного мартенситного $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения появлялся ревертированный аустенит, максимальное ($\approx 40\%$) содержание которого соответствовало температуре старения 620°C.

Статическое и циклическое нагружения проводили на испытательных машинах Инстрон-1185 и Инстрон-8001 при комнатной температуре*. Деформирование в малоцикловой области при числе циклов нагружения $N < 2000$ осуществляли с частотой 10 Hz по схемам пилообразного знакопеременного «растяжения-сжатия», а также знакопостоянных от нулевого «растяжения-растяжения» и «сжатия-сжатия» в «мягком» режиме (поддержание постоянной амплитуды нагрузки).

Максимальная амплитуда цикла по абсолютной величине соответствовала значениям $\sigma = (0.80–0.95)\sigma_{0.2}$. Коэффициент асимметрии цикла при знакопеременном нагружении $R = -1$, а при знакопостоянном – $R = 0.05$. Запись кривых статического деформирования в координатах «напряжение–деформация» производили при испытаниях со скоростью перемещения активного захвата 1 mm/min с использованием экстензометра с базой 25 mm. Кривые растяжения записывали до циклического деформирования и после 1(2), 100 и 1100 циклов нагружения. Содержание аустенитной фазы в образцах определяли рентгеноструктурным методом, а в процессе испытаний контролировали на магнитно-измерительном комплексе Ремаграф-500**.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Известно [2], что развитие деформационных мартенситных $\gamma \rightarrow \varepsilon$ - и $\gamma, \varepsilon \rightarrow \alpha'$ -превращений при статических механических испытаниях метастабильных сплавов на основе Fe–Mn- и Fe–Mn–Cr-твердых растворов вносит дополнительный вклад в деформационное упрочнение, что проявляется в изменении типа кривой «напряжение–деформация» и в увеличении степенного показателя деформационного упрочнения n в уравнении Людвики:

$$\sigma = \sigma_0 + Ke^n, \quad (1)$$

где σ_0 – начальное сопротивление пластической деформации, K – эмпирический коэффициент, e – степень деформации.

* В проведении механических испытаний участвовал В.В. Юровских (ОМЗ-СПЕЦСТАЛЬ, г. Екатеринбург)

** Содержание аустенитной фазы в стали ЭП678 магнитным методом определено к.т.н. С.Ю. Митропольской (ИМАШ УрО РАН)

Образование термоупругого ε -мартенсита в Fe–Mn-метастабильных сплавах происходит при напряжениях $\sigma \approx \sigma_{el}$, а появление ферромагнитного α' -мартенсита возможно только в условиях пластического деформирования. В работе [3] методом прецизионного магнитного анализа было показано, что в метастабильных сплавах на основе Fe–Mn- и Fe–Mn–Cr-твердых растворов первый дискретный прирост α' -мартенсита деформации при растяжении происходит при напряжениях, близких к величине условного предела текучести $\sigma_{0.2}$.

Результаты проведенных циклических испытаний показали, что в сплаве С1Т со структурой метастабильного аустенита при достижении первых 100 циклов нагружения с постоянной амплитудой напряжений наблюдается сужение петли гистерезиса, что свидетельствует о наличии эффекта циклического деформационного упрочнения (рис. 1).

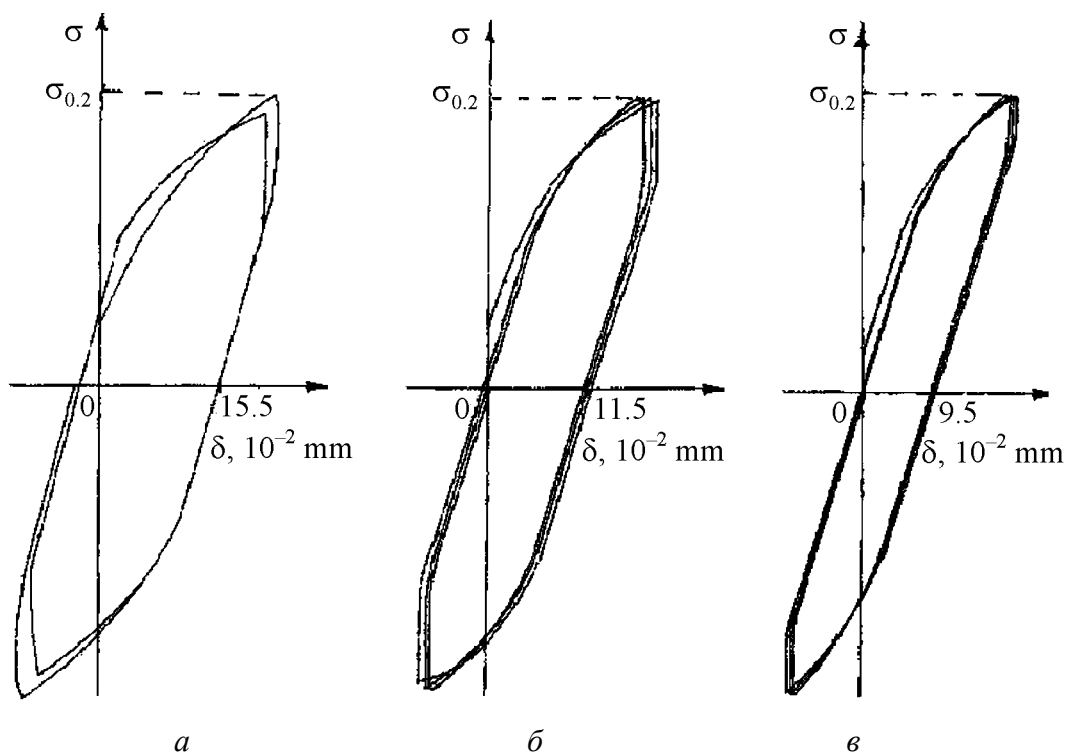


Рис. 1. Кривые деформирования сплава С1Т после различного количества циклов нагружения ($\sigma = 0.80\sigma_{0.2}$): *a* – $N = 1(2)$, *б* – 100, *в* – 1000

По данным рентгеноструктурного анализа после первых 100 циклов знакопеременного нагружения ($R = -1$) с максимальной амплитудой ниже величины $\sigma_{0.2}$ в условиях накопления макропластической деформации в образцах фиксируется около 5% α' -мартенсита деформации. После 1000 циклов знакопеременного «растяжения-сжатия» происходит дальнейшее сужение петли гистерезиса, а количество α' -мартенсита достигает 12%. При этом содержание ε -фазы после 100 циклов повышается с 55 до 65%, а с ростом числа циклов до $N = 1000$ – снижается до 60%.

В отличие от метастабильных сплавов на основе Fe–Mn-твердого раствора высокопрочные сплавы типа ЭП678 после старения на максимальную прочность ($T = 480\text{--}520^\circ\text{C}$) при статических испытаниях характеризуются низкой способностью к деформационному упрочнению и ранней локализацией пластической деформации, а по своему поведению при циклическом нагружении относятся к циклически разупрочняемым материалам [4].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение структуры сплава ЭП678 при повышении температуры старения оказывает существенное влияние на вид кривых статического и циклического деформирования. Так, наблюдаемое усиление интенсивности деформационного упрочнения при статических испытаниях с повышением температуры старения от 580 до 620°C (рис. 2) связано главным образом с увеличением в структуре сплава при повышенных температурах старения ($T > 540^\circ\text{C}$) доли метастабильного ревертированного аустенита.

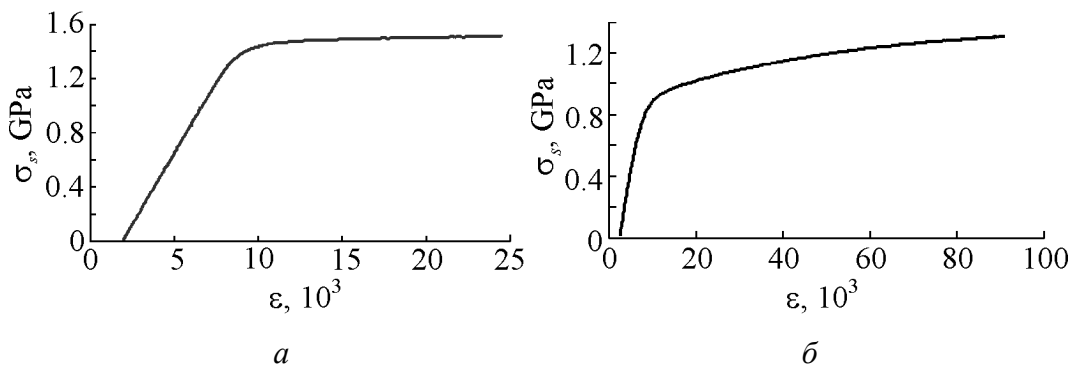


Рис. 2. Кривые деформационного упрочнения сплава ЭП678 после старения при температуре 580°C (а) и 620°C (б)

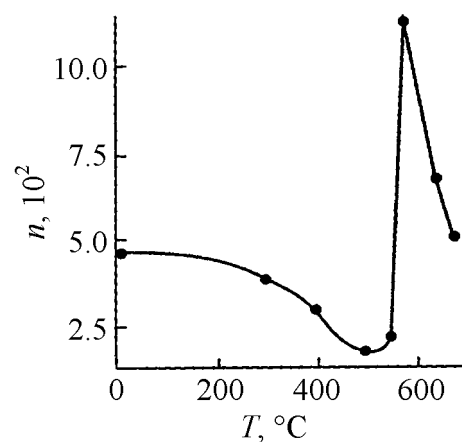


Рис. 3. Влияние температуры старения на степенной показатель деформационного упрочнения сплава ЭП678 [5]

Типичная зависимость изменения степенного показателя деформационного упрочнения при статическом растяжении от температуры старения сплава ЭП678, приведенная на рис. 3, указывает на то, что в области максимального содержания в структуре стали ревертированного аустенита ($T = 600^\circ\text{C}$) наблюдается ярко выраженный максимум значений степенного показателя n [5].

Следует отметить, что деформационное поведение ряда структурно-стабильных конструкционных материалов в процессе усталостных испытаний может противоположным образом меняться в зависимости от числа циклов нагружения. Например, по данным [6], в углеродистых

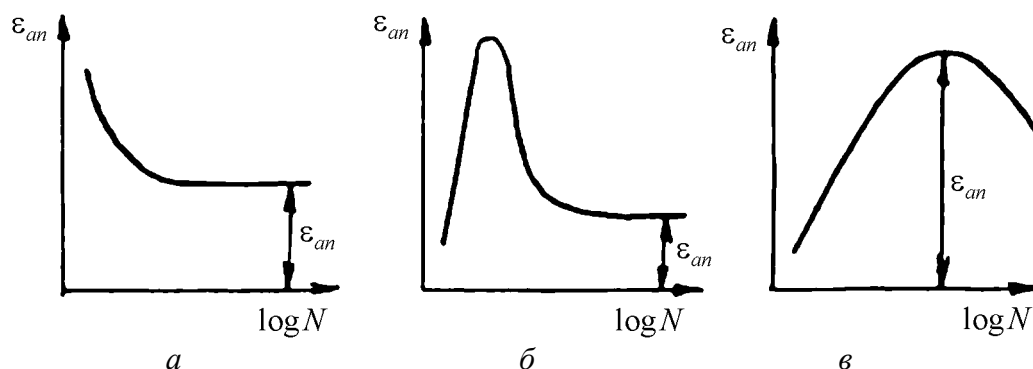


Рис. 4. Кривые циклического упрочнения/разупрочнения при постоянной амплитуде нагрузки для цветных металлов (*a*), углеродистых сталей (*б*) и нержавеющей сталей (*в*) [6]

сталей и нержавеющей сплавах при постоянной амплитуде нагрузки и определенном числе циклов наблюдается смена типа деформационного поведения от разупрочнения к упрочнению (рис. 4).

В сплавах с метастабильным аустенитом развитие мартенситных превращений при деформации вносит дополнительный вклад в механическое поведение при циклическом деформировании. Однако его влияние на процессы деформационного упрочнения/разупрочнения зависит как от объемной доли и стабильности ревертированного аустенита, так и от уровня действующих напряжений и числа циклов нагружения. Циклические знакопеременные испытания образцов сплава ЭП678 после старения при температуре 580°C, вызывающего появление в структуре 8% ревертированного аустенита, с амплитудой нагрузки на уровне $\sigma = 0.80\sigma_{0.2}$ показали, что с увеличением числа циклов от 1 до 100 и далее до 1100 петля механического гистерезиса несколько расширяется (рис. 5,*a*). Это свидетельствует о сохранении типичного

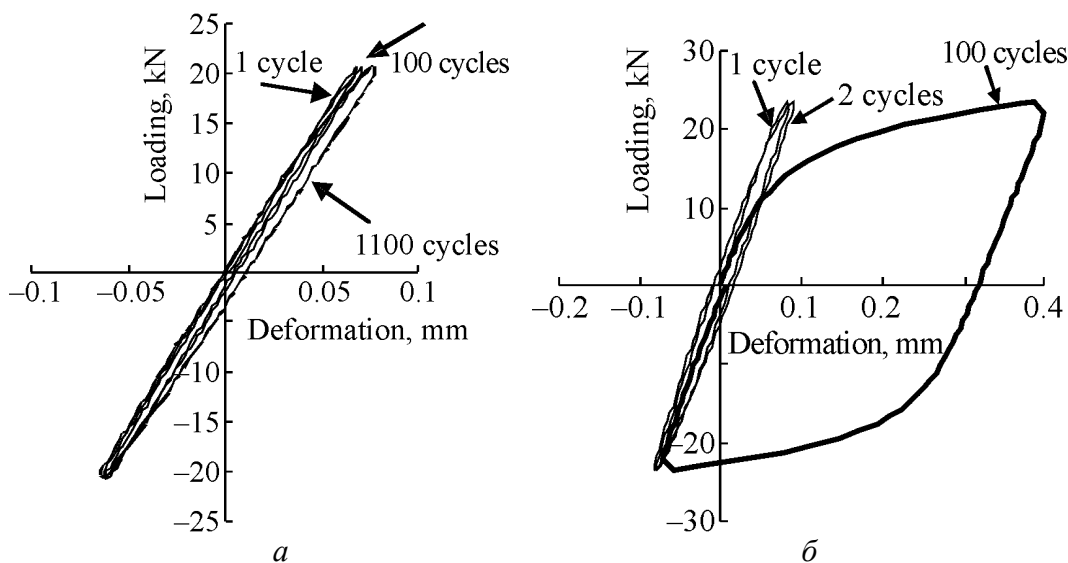


Рис. 5. Кривые деформирования после различного количества циклов нагружения при $\sigma = 0.80\sigma_{0.2}$ (*a*) и $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ (*б*) сплава ЭП678, состаренного при 580°C, 3 h

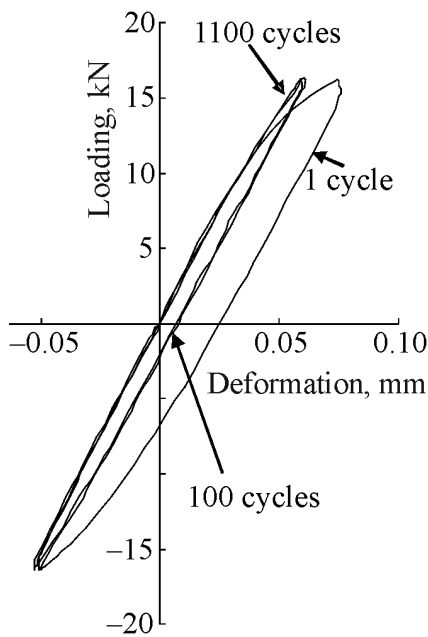


Рис. 6. Кривые деформирования после различного количества циклов нагружения при $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ сплава ЭП678, состаренного при 620°C, 3 h

для данных материалов эффекта циклического деформационного разупрочнения, что может быть связано с отсутствием деформационных мартенситных превращений при указанной амплитуде нагрузки.

При более высокой амплитуде напряжений на уровне $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ резкое разупрочнение проявляется уже после 100 циклов нагружения (рис. 5,б).

Испытания на статическое растяжение образца, состаренного при 580°C, показали, что после циклического деформирования по наиболее жесткой схеме (100 циклов знакопеременного нагружения при $\sigma \approx 0.95\sigma_{0.2}$) накопление циклической поврежденности приводит к заметному снижению по сравнению с исходными значениями условного предела текучести с 1245 до 1165 МПа, временного сопротивления отрыву с 1365 до 1255 МПа, а также к уменьшению относительного удлинения с 14 до 12% и относительного сужения с 64 до 56%. Количество аустенита в структуре сплава ЭП678 при таком режиме циклического нагружения снизилось с 8 до 3.5%.

Повышение температуры старения с 580 до 620°C приводит к изменению типа циклического деформационного поведения. После первых 100 циклов нагружения происходит сужение петли механического гистерезиса (рис. 6), что свидетельствует о развитии эффекта циклического упрочнения, вызванного деформационным мартенситным превращением. Форма петли после достижения числа циклов $N = 100$ стабилизируется и при дальнейшем увеличении числа циклов до $N = 1100$ изменяется незначительно.

Наблюдаемая смена типа механического поведения (разупрочнение/упрочнение) сплава ЭП678 в результате повышения температуры старения с 580 до 620°C, обеспечивающего формирование максимального количества в структуре ревертированного аустенита (36%), при амплитуде циклической нагрузки $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ проявляется для всех изученных знакопеременных и знакопостоянных схем циклического деформирования.

Интенсивность образования α' -мартенсита в перестаренном сплаве ЭП678 в процессе циклического деформирования зависит от амплитуды нагружения, формы цикла и температуры старения, определяющей стабильность аустенита по отношению к пластической деформации. Как видно из результатов, приведенных на рис. 7, содержание аустенитной фазы в деформированном образце после старения при 620°C независимо от формы цикла наиболее заметно уменьшается при первых 100 циклах нагружения, а затем

для данных материалов эффекта циклического деформационного разупрочнения, что может быть связано с отсутствием деформационных мартенситных превращений при указанной амплитуде нагрузки.

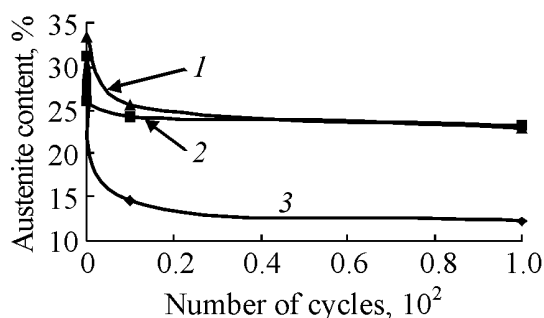


Рис. 7. Влияние схемы циклического деформирования сплава ЭП678 (старение 620°C, 3 h) при $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ на содержание аустенита в зависимости от числа циклов: 1 — «растяжение-растяжение», 2 — «сжатие-сжатие», 3 — «растяжение-сжатие»

оно снижается в значительно меньшей степени. Это хорошо согласуется с выявленной тенденцией стабилизации петли механического гистерезиса после 100 циклов нагружения (см. рис. 6). Следует отметить, что при постоянной амплитуде напряжений, соответствующей величине $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$, образование α' -деформации при циклических испытаниях с одинаковым количеством полуциклов нагружения наиболее активно идет при схеме знакопеременного «растяжения-сжатия» по сравнению со схемами знакопостоянного «растяжения-растяжения» и «сжатия-сжатия». При этом количество аустенита при знакопеременном циклическом деформировании снижается в три раза (с 36 до 12%).

В то же время при статических испытаниях данного сплава в зоне равномерной деформации разрушенных образцов было зафиксировано более высокое (16–17%) содержание сохранившегося в структуре аустенита.

Наблюдаемое различие в изменении фазового состава сплава ЭП678 при циклическом деформировании в зависимости от формы цикла может быть связано с проявлением при знакопеременном нагружении эффекта Баушингера, заключающегося в снижении сопротивления пластическому течению при повторной растягивающей нагрузке после достижения такой же нагрузки в полуцикле сжатия. Таким образом, при повторном растяжении величина напряжения по отношению к пределу текучести при циклическом деформировании оказывается ниже, и деформационное мартенситное превращение идет значительно активнее.

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии деформационных мартенситных превращений в сплавах с метастабильным аустенитом на процессы статического и циклического деформирования и указывают на возможность прогнозирования механического поведения данных материалов при различных схемах циклического нагружения по результатам ускоренных малоцикловых испытаний и анализа формы петли механического гистерезиса.

1. М.Д. Перкас, В.М. Кардонский, Высокопрочные мартенситносталяющие стали, Металлургия, Москва (1970).

2. И.Н. Богачев, В.Ф. Еголаев, Структура и свойства железомарганцевых сплавов, Металлургия, Москва (1973).
3. Э.С. Горкунов, М.Б. Ригмант, С.В. Гладковский, Контроль. Диагностика 27, № 9, 62 (2000).
4. В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев, Структура и усталостное разрушение металлов, Металлургия, Москва (1980).
5. С.В. Гладковский, Ю.В. Калетина, А.М. Филиппов, ФММ 87, № 3, 86 (1999).
6. В.Т. Троценко, Проблемы прочности № 4, 5 (2005).

S.V. Gladkovsky, D.I. Vichuzhanin, S.V. Smirnov, T.P. Bogdanova, B.M. Efros

EFFECTS OF CYCLIC DEFORMATION HARDENING IN ALLOYS WITH METASTABLE AUSTENITE

Influence of cyclic loading in the low-cycle region on the shape of mechanical-hysteresis loop in alloys with metastable austenite has been studied. Mechanical behavior of alloys C1T and ЭП678 under cyclic load resulting in structural instability as well as changes in the kinetics of deformation α' -martensite formation dependent on cycle amplitude and character of load application have been revealed.

Fig. 1. Curves of C1T alloy deformation after different number of loading cycles ($\sigma = 0.80\sigma_{0.2}$): *a* – $N = 1(2)$, *b* – 100, *c* – 1000

Fig. 2. Curves of ЭП678 alloy deformation hardening after ageing at a temperature of 580 (*a*) and 620°C (*b*)

Fig. 3. Influence of ageing temperature on exponent of ЭП678 alloy deformation hardening [5]

Fig. 4. Curves of cyclic hardening/loss of hardening for a constant loading amplitude for non-ferrous metals (*a*), carbon steels (*b*) and stainless alloys (*c*) [6]

Fig. 5. Deformation curves past different number of loading cycles for $\sigma = 0.80\sigma_{0.2}$ (*a*) and $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ (*b*) of ЭП678 alloy aged at 580°C for 3 h

Fig. 6. Deformation curves past different number of loading cycles for $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ of ЭП678 alloy aged at 620°C for 3 h

Fig. 7. Influence of cyclic deformation scheme on austenite content in ЭП678 alloy (ageing 620°C, 3 h) for $\sigma = 0.95\sigma_{0.2}$ and depending on the number of cycles: 1 – «tension-tension», 2 – «compression-compression», 3 – «tension-compression»