

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОЧЕТАНИИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ТЕЧЕНИЯ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

Ю.Н. Ребяков<sup>1</sup>, О.Ф. Чернявский<sup>2</sup>

Предложена новая методика испытаний для определения механических характеристик материалов при малоцикловом деформировании с ненулевыми размахами и приращениями неупругих деформаций за цикл. На примере нескольких типичных сталей установлены основные закономерности изменения деформационных свойств вследствие взаимного влияния циклического упрочнения и квазистатического наклепа.

*Ключевые слова:* циклическое неупругое деформирование, накопление деформаций, деформационное упрочнение

Деформационные свойства материалов подробно изучены для двух видов малоциклового нагружения – знакопеременного течения с ненулевыми размахами неупругих деформаций за цикл [1–6 и др.] и прогрессирующего накопления приращений деформаций за цикл [6, 7]. Рост нагрузок и температур в новых конструкциях и, с другой стороны, переход от обеспечения прочности к связанным задачам техногенной безопасности [8] все чаще приводят к необходимости анализа процессов, в которых одновременно отличны от нуля как размахи, так и приращения неупругих деформаций. Свойства материалов в таких условиях не изучены: неизвестны основные закономерности взаимного влияния циклических и квазистатических деформаций, отсутствуют методы проведения испытаний, нет соответствующих стандартов и справочных данных. Среди причин такого состояния одной из главных является, по-видимому, проблема измерений. В процессе испытаний должны фиксироваться размахи полных и пластических деформаций за цикл, приращения деформаций за цикл и полная накопленная деформация вплоть до разрушения. При одинаковых циклических и статических повреждениях за цикл эти величины могут различаться в тысячи и даже десятки тысяч раз, а их измерение проводится чаще всего одним деформометром.

Для преодоления этой основной трудности предлагается использовать блочное нагружение стандартных образцов, в котором каждый блок включает два этапа: вначале жесткое циклическое нагружение с заданным размахом деформаций и числом циклов, а затем увеличение накопленной деформации. При этом приращение деформации в каждом таком блоке задается так, чтобы расчетное отношение накопленного статического повреждения к циклическому равнялось заданной величине (например, единице). Блоки нагружения повторяются вплоть до разрушения образца. Приближенность такого подхода очевидна, но при достаточно большом числе циклов в каждом блоке приращения деформации становятся соизмеримы с шириной петли пластического гистерезиса. Выбор величин размахов деформаций за цикл, числа циклов и приращения деформации в блоке определяется, в частности, возможностями деформометра. Крайними случаями при этом являются долом образца после некоторого числа жестких циклов и такое нагружение, при котором блок содержит один цикл знакопеременного деформирования с последующим приращением деформации.

В качестве примеров, иллюстрирующих, прежде всего, качественные особенности деформационных свойств сталей с учетом взаимного влияния эффектов циклического и статического деформирования, ниже приводятся результаты испытаний сталей 03Х21Н32МЗБ (ЭП 864), ЭИ 612 и сплава ХН55МВЦ при различных температурах без длительных выдержек. Для этих сталей в жестких циклах характерно типичное поведение: циклическое упрочнение (или разупрочнение – в зависимости от предшествующей истории) на стадии приработки сменяется стабилизацией с последующим разупрочнением на стадии предразрушения. Испытания проводились при растяжении-сжатии корсетных образцов с фиксацией поперечной деформации  $\varepsilon'$ .

<sup>1</sup> Ребяков Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет.

<sup>2</sup> Чернявский Олег Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: cher@sopro.susu.ac.ru

Деформирование образцов производилось по двум программам. В первой из них вначале производилось жесткое циклическое деформирование с постоянным заданным размахом пластической деформации за цикл  $\delta\varepsilon'_p$ . Затем следовал статический долом, т.е. монотонное увеличение деформации вплоть до разрушения. Испытания проводились при различных размахах деформации и различных числах циклов  $N$ . Полученная диаграмма деформирования сопоставлялась с диаграммой однократного (без циклических нагружений) деформирования.

В испытаниях по второй программе проводилось блочное нагружение образца: выполнялось  $N$  жестких циклов с заданным постоянным размахом пластической деформации за цикл  $\delta\varepsilon'_p$ , после этого давалось приращение деформации  $\Delta\varepsilon'_p$ , величина которого обеспечивала равенство расчетных статического и циклического повреждений в каждом блоке. Такие блоки из двух этапов с примерно равными повреждениями повторялись вплоть до разрушения образца. Статическое повреждение в блоке определялось как отношение приращения деформации за цикл  $\delta\varepsilon'_p$  к разрушающей деформации при статическом нагружении  $\varepsilon'_f$ . Циклическое повреждение определялось как отношение числа циклов в блоке  $N$  к разрушающему  $N_f$  при том же размахе деформации за цикл. Величины  $\varepsilon'_f$  и  $N_f$  вычислялись с использованием справочных данных [6], полученных ранее при испытаниях на той же установке.

Типичные результаты испытаний с доломом после одного блока жестких циклов иллюстрирует рис. 1. Положение и форма диаграмм долома зависят от циклического упрочнения (разупрочнения), накопленного на предыдущем этапе. Только для циклически стабильных материалов диаграмма долома может совпадать с диаграммой статического однократного деформирования.

При достаточно заметной ширине петли пластического гистерезиса переход от этой петли к диаграмме статического деформирования (долома) происходил плавно, без сколько-нибудь заметных изломов. В точке реверса при выходе из петли гистерезиса касательная к диаграмме долома являлась касательной к продолжению петли гистерезиса. Этот факт, по-видимому, объясняется «памятью» материала. Носителями «памяти» являются остаточные микронапряжения и изменения структуры, которые в момент выхода из петли гистерезиса соответствуют предшествующему процессу циклического деформирования. Можно отметить, что при упругой разгрузке и повторном нагружении (т.е. при исчезающе малой ширине петли гистерезиса) остаточные микронапряжения и изменения структуры также весьма малы, но, как известно, даже их сравнительно небольшое влияние обычно отчетливо проявляется при испытаниях.

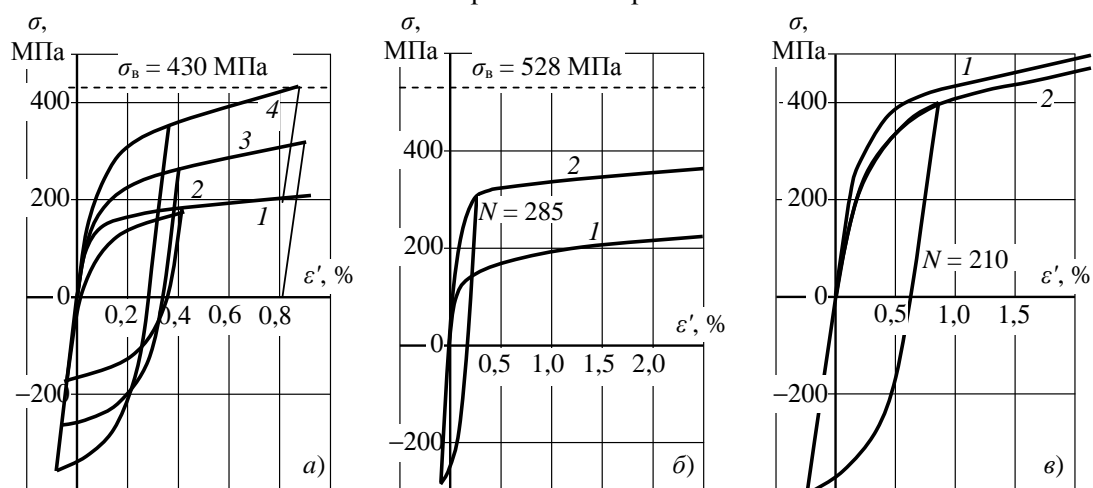


Рис. 1. Кривые деформирования ( $\varepsilon' = \Delta d/d_0$ ). Кривая 1 соответствует статическому нагружению.

а) ЭП864, 600 °С. 2,3,4 – долома после циклического упрочнения на базе 1, 25 и 450 циклов;

б) ХН55МВЦ, 400 °С. 2 – долом после 285 циклов при  $\delta\varepsilon' = 0,187\%$ ; в) ЭИ-612, 650 °С. 2 – долом после 210 циклов

Следующей важной особенностью диаграммы долома для всех испытанных материалов является весьма медленное «забывание» циклического упрочнения (или разупрочнения) при увеличении накопленной деформации (статического повреждения). В соответствии с полученным на этапе циклического деформирования циклическим упрочнением диаграмма долома проходит

выше (при разупрочнении – ниже) кривой однократного монотонного деформирования. С увеличением накопленной деформации расстояние между этими кривыми постепенно уменьшается, но к моменту разрушения образца может оставаться значительной частью той величины, которая имела место в момент выхода из петли гистерезиса даже в случае, когда циклическое повреждение является небольшим. При этом положение кривой долома, определяемое величиной циклического упрочнения или разупрочнения, зависит от размаха пластической деформации и числа циклов.

Результаты испытаний по второй программе (блок жестких циклов и последующее приращение деформации с примерно таким же расчетным повреждением, какое было накоплено в блоке жестких циклов) иллюстрирует рис. 2. Штриховые линии здесь соответствуют первому полциклу каждого блока, сплошные – последнему циклу. Числа под петлями гистерезиса показывают общее число циклов от начала нагружения до конца данного блока. Последним был блок, в котором образовывалась макротрещина. Начальный участок кривой статического однократного деформирования обозначен 0, предел прочности  $\sigma_B$ .

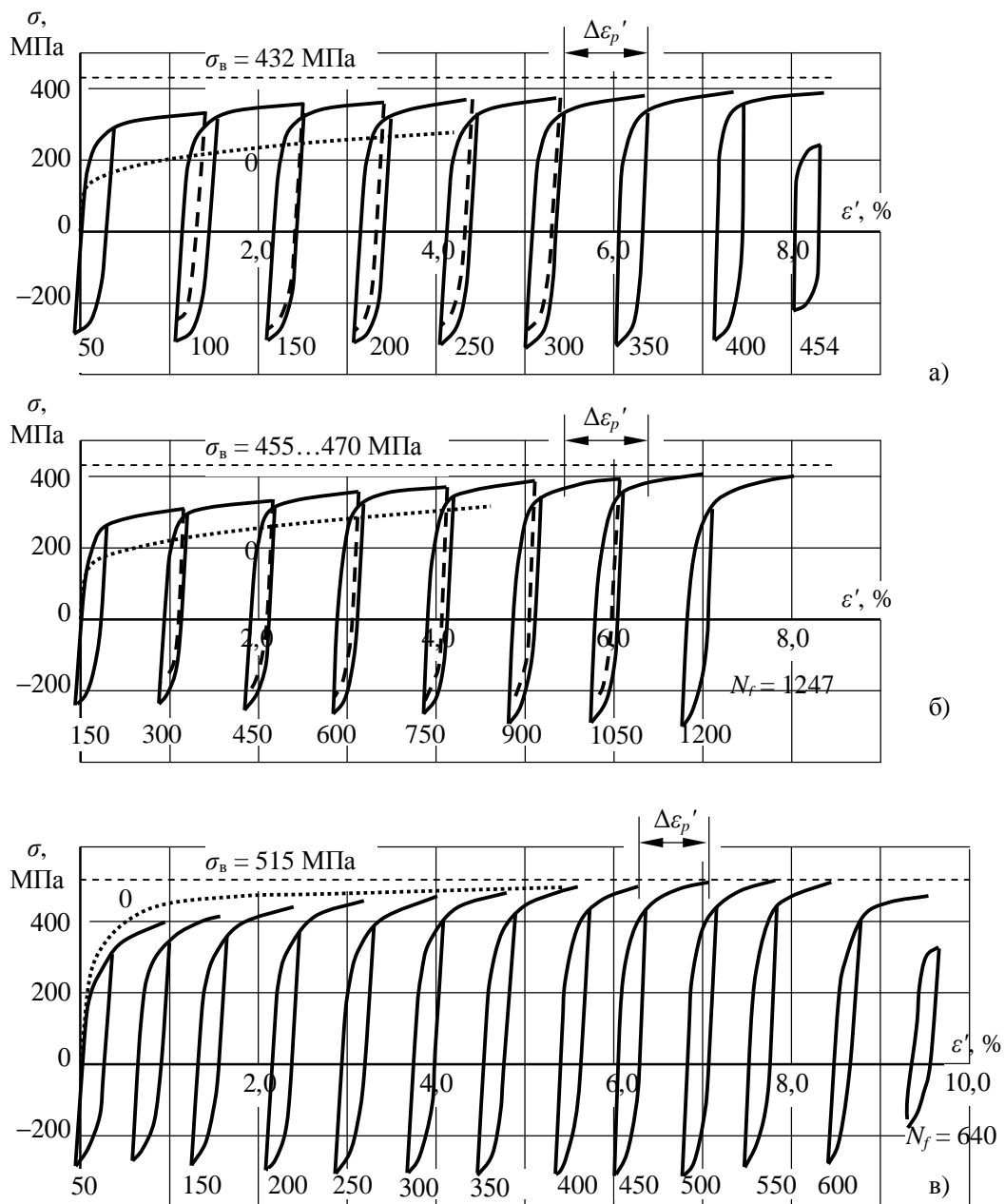


Рис. 2. Блочное нагружение (кривая 0 – статическое нагружение): а) сплав ЭП864, 600 °С;  $\Delta\varepsilon_p'' = 1,06\%$ ,

$\Delta\varepsilon_p'' = 0,27\%$ ; б) ЭП864, 400 °С; в) ЭИ612 при 650 °С;  $\Delta\varepsilon_p' = 0,726\%$ ,  $\Delta\varepsilon_p' = 0,2\%$

Рис. 2 показывает, что все отмеченные выше характерные особенности диаграмм деформирования, обнаруженные при доломе после жестких циклов, полностью сохраняются при блочном нагружении: кривая однократного деформирования не характеризует процесс накопления деформаций; выход из пели гистерезиса соответствует обобщенной кривой; циклическое упрочнение (разупрочнение) существенно влияет на накопленные деформации, но форма петель слабо зависит от статических повреждений в широком диапазоне последних. Очевидно, что эти особенности сохраняются и в том случае, когда блок будет содержать один цикл с последующим приращением деформации.

Вместе с тем необходимо отметить, что стабильное накопление остаточных перемещений было обусловлено чередованием в каждом блоке циклического разупрочнения и наклепа, вызванного увеличением статического повреждения. Этот механизм деформирования отличается от общепринятых представлений о том, что стабильное прогрессирующее формоизменение возможно лишь при отсутствии деформационного упрочнения [7].

### Литература

1. Прочность при малоцикловом нагружении: Основы методов расчетов и испытаний / С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, Н.А. Махутов и др. – М.: Наука, 1975. – 288 с.
2. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. – 493 с. – Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
3. Мэнсон, С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость / С. Мэнсон. – М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.
4. Москвитин, В.В. Циклические нагружения элементов конструкций / В.В. Москвитин. – М., Наука, 1981. – 344 с.
5. Гохфельд, Д.А. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.С. Саадаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.
6. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.
7. Гохфельд, Д.А. Несущая способность конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.Ф. Чернявский. – М.: Машиностроение, 1979. – 263 с.
8. Безопасность России: правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: анализ риска и проблем безопасности: в 4 ч. / Н.В. Абросимов, А.И. Агеев, В.В. Аладинский и др. – М.: Знание, 2006. – Ч.1. Основы анализа и регулирования безопасности. – 639 с.

*Поступила в редакцию 1 марта 2012 г.*

## DEFORMATION PROPERTIES OF MATERIALS IN COMBINATION OF ALTERNATING PLASTIC FLOW AND RATCHETING

Yu.N. Rebyakov<sup>1</sup>, O.F. Cherniavsky<sup>2</sup>

A new test method for determining the mechanical properties of materials under low-cycle deformation with non-zero plastic strain range and strain increments per cycle. Basic laws for deformation properties and their changes due to the mutual influence of cyclic hardening and quasi-static strain hardening are established for several typical steels.

*Keywords:* cyclic inelastic deformation, strain accumulation, ratcheting, strain hardening.

### References

1. Serensen S.V., Shnejderovich R.M., Makhutov N.A. *et al. Prochnost' pri malociklovom nagruzhении: Osnovy metodov raschetov i ispytaniij* (Strength low-cycle loading: Basic methods of calculations and tests.). Moscow, Nauka, 1975. 288 p. (in Russ.).
2. Makhutov N.A. *Konstrukcionnaja prochnost', resurs i tekhnogennaja bezopasnost'. Ch. 1. Kriterii prochnosti i resursa* (Structural strength, resource and technogenic safety. Part 1. The criteria of strength and resource). Novosibirsk, Nauka, 2005. 493 p.; *Ch. 2. Obosnovanie resursa i bezopasnosti* (Part 2. Justification of resources and security). Novosibirsk, Nauka, 2005. 610 p. (in Russ.).
3. Mehnson S. *Temperaturnye naprjazhenija i malociklovaja ustalost'* (Thermal stress and low cycle fatigue). Moscow, Mashinostroenie, 1974. 344 p. (in Russ.).
4. Moskvitin V.V. *Ciklicheskie nagruzheniya ehlementov konstrukcij* (Cyclic loading of structural elements). Moscow, Nauka, 1981. 344 p. (in Russ.).
5. Gokhfel'd D.A., Saadakov O.C. *Plastichnost' i polzuchest' ehlementov konstrukcij pri povtornykh nagruzhenijakh* (Plasticity and creep of structural elements under repeated loadings). Moscow, Mashinostroenie, 1984. 256 p. (in Russ.).
6. Gokhfel'd D.A., Gecov L.B., Kononov K.M. *et al. Mekhanicheskie svojjstva stalejj i splavov pri nestacionarnom nagruzhении. Spravochnik* (The mechanical properties of steels and alloys under unsteady loading. Directory). Ekaterinburg, UrO RAN, 1996. 408 p. (in Russ.).
7. Gokhfel'd D.A., Chernjavskij O.F. *Nesushhaja sposobnost' konstrukcij pri povtornykh nagruzhenijakh* (Bearing capacity of structures under repeated loadings.). Moscow, Mashinostroenie, 1979. 263 p. (in Russ.).
8. Abrosimov N.V., Ageev A.I., Aladinskij V.V. *et al. Bezopasnost' Rossii: pravovye, soci-al'no-ehkonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty: analiz riska i problem bezopasnosti. Ch.1. Osnovy analiza i regulirovanija bezopasnosti* (Russia's security: legal, social, economic, scientific and technical aspects: risk analysis and security problems. Part 1. Fundamentals of Safety and Regulation). Moscow: Znanie, 2006. 639 p. (in Russ.).

<sup>1</sup> Rebyakov Yuri Nicolaevich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South-Ural State University.

<sup>2</sup> Cherniavsky Oleg Fedorovich is Dr. Sc. (Engineering), Professor, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South-Ural State University.

E-mail: cher@sopro.susu.ac.ru