

## О ДЕФОРМИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО ЗАМКНУТЫМ ТРАЕКТОРИЯМ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В. Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков (Тверь)

### Abstract

*In this paper, the experimental results of study of additional hardening on disproportionate load trajectories are given. The constant curvature trajectories and inscribed closed splines are investigated. Additional hardening is shown to appear on constant curvature trajectories. The hardening level is found to considerably depend on a curvature of deformation trajectory. The hypothesis of coplanarity is verified.*

**1. Введение.** Экспериментальные исследования закономерностей упругопластического деформирования материалов на траекториях непропорционального нагружения при малоцикловых испытаниях привели к обнаружению эффекта существенного упрочнения некоторых материалов, который получил в литературе название эффекта "дополнительного упрочнения".

По мнению П.В.Трусова [1], деформационное упрочнение характеризуется несколькими параметрами, главным из которых является энергия дефекта упаковки (ЭДУ). По классификации [1] материалы можно распределить по трем группам - с высоким, средним и низким уровнями ЭДУ. Материалы с низким уровнем ЭДУ, к которым отнесены аустенит нержавеющей сталей и сплавы, обнаруживают наибольшее дополнительное упрочнение. Действительно, эффект существенного упрочнения при непропорциональном деформировании, как нам известно из литературы, был получен только на сталях 12x18H10T, 12x18xH9 [2], 03x21H32 [1], 08x18H10T [3], которые относятся к классу высоколегированных нержавеющей сталей. Отмеченный эффект дополнительного упрочнения необходимо, очевидно, учитывать в расчетах процессов сложного нагружения. Так, в [1] в качестве варианта описания дополнительного циклического упрочнения предложена аппроксимация функции упрочнения, включающая пять материальных констант, определяемых из опытов на циклическое пропорциональное и непропорциональное нагружение, что в значительной мере усложняет определяющие соотношения. В то же время, в исследовании данной проблемы имеется ряд неучтенных моментов, которые позволяют, на наш взгляд, упростить, по крайней мере в первом приближении, решение данной задачи.

**2. Экспериментальные исследования.** Эксперименты проводились на автоматизированном комплексе СМ-ЭВМ [4] на тонкостенных круговых цилиндрических оболочках, изготовленных точением из сталей 45, 9Х2 и Х16Н9Г2С и сплава Д16 при воздействии осевой силы и крутящего момента. Химический состав (в процентах) материалов, из которых изготовлены оболочки, приведен в таблице. Химический анализ элементов производился энергодисперсионным рентгеновским методом на комплексе, включающем сканирующий электронный микроскоп CamScan-4 и энергодисперсионный микроанализатор QX-2000. Процентный состав углерода не

определялся. Знак «<» перед цифрой означает, что наличие данного элемента выявлено на уровне ошибки.

Химический состав исследуемых материалов

Марка материала	Содержание элементов, %					
	Fe	Si	Cr	Ni	Mn	Ti
Сталь 45	98,32	0,42	<0,21	-	1,20	-
X16H9Г2С	70,54	1,67	16,29	8,47	2,46	0,54
9Х2	97,55	<0,25	2,19	<0,30	<0,27	-
Д16	0,99	-	-	-	0,49	-

В целях исключения влияния реологических эффектов на закономерности упругопластического деформирования материалов, скорость деформирования по длине дуги траекторий принята постоянной и равнялась  $S = 3 \cdot 10^{-6}$ . В качестве траекторий сложного нагружения исследовались траектории постоянной кривизны в плоскости Э1-Э3 девиаторного пространства деформаций А.А.Ильюшина и вписанные в них замкнутые многозвенные ломаные с углами излома 90° и 180°, а также кривые эллиптического типа.

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \varepsilon_{11}, \quad \varepsilon_2 = \sqrt{2(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{11}/2)}, \quad \varepsilon_3 = \sqrt{2} \varepsilon_{12}. \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_{ij}$  - компоненты тензора-девиатора деформаций. Причем, как показывают эксперименты, при развитых пластических деформациях для рассматриваемых материалов можно использовать условие несжимаемости материала.

Как и в [1], обнаружено, что в максимальной степени эффект дополнительного упрочнения проявляется на траекториях постоянной кривизны. Причем эксперименты на сталях 45, 9Х2 и сплаве Д16 показали, что уже в начале третьего цикла параметры напряженного состояния (траектория нагружения) стабилизируются и дополнительное упрочнение не превышает 15-25 %. Аналогичная по величине степень упрочнения для данных материалов была получена также на многозвенных ломаных траекториях при углах сближения в точке излома порядка 120° в пространстве деформаций.

В то же время деформирование стали X16H9Г2С по замкнутым криволинейным траекториям в плоскости Э1 - Э3 приводит к существенному большему упрочнению, чем у указанных выше материалов. Оболочка e3 (траектория нагружения показана на рис. 1) была растянута до значения  $S_0 = \varepsilon_1^{\max} = 0,018$ , после чего в плоскости Э1-Э3 реализовано три витка траектории постоянной кривизны  $\kappa_1 = 100$ , причем  $\varepsilon^{\max}$  на окружности было равно  $S_0$ . Из рис. 1 видно, что даже на четвертом витке траектории параметры напряженного состояния не стабилизируются и дальнейшее продолжение процесса сопровождается ростом  $\sigma$  в текущей точке траектории (эксперимент был остановлен в связи с исчерпанием функциональных возможностей силовых агрегатов

испытательного комплекса по нагрузкам). При этом превышение величины модуля вектора напряжения в начале четвертого витка в сравнении со значением  $\sigma$  в точке излома составило порядка 70 %.

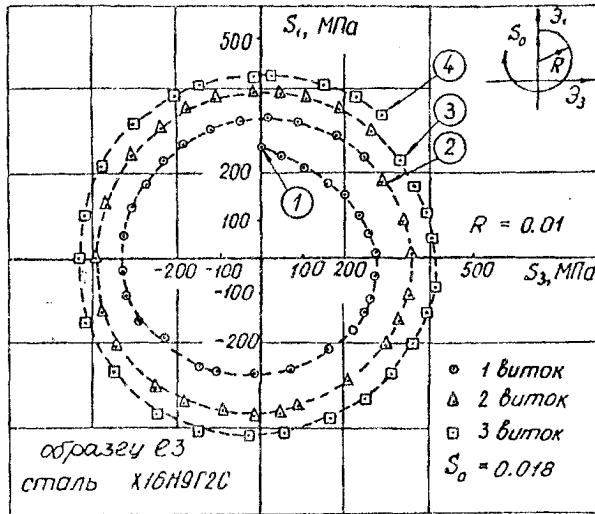


Рис. 1. Экспериментальная траектория нагружения

Эксперименты показали, что степень упрочнения материала как на первом витке, так и в целом на траектории, существенно зависит от кривизны траектории деформирования и возрастает с уменьшением  $\kappa_1$ , о чем свидетельствуют результаты, представленные на рис. 2. Здесь кривые e3 и e25 соответствуют исходным диаграммам деформирования материалов. Кривые e25pr и e3pr представляют диаграммы простого процесса после предварительного сложного нагружения и разгрузки образцов e25 и e3. Причем оболочка e25 предварительно деформировалась по криволинейной траектории  $\kappa_1 = 200$  и при  $\varepsilon^{\max} = 0,018$  (как и у образца e3) до полной стабилизации траектории нагружения.

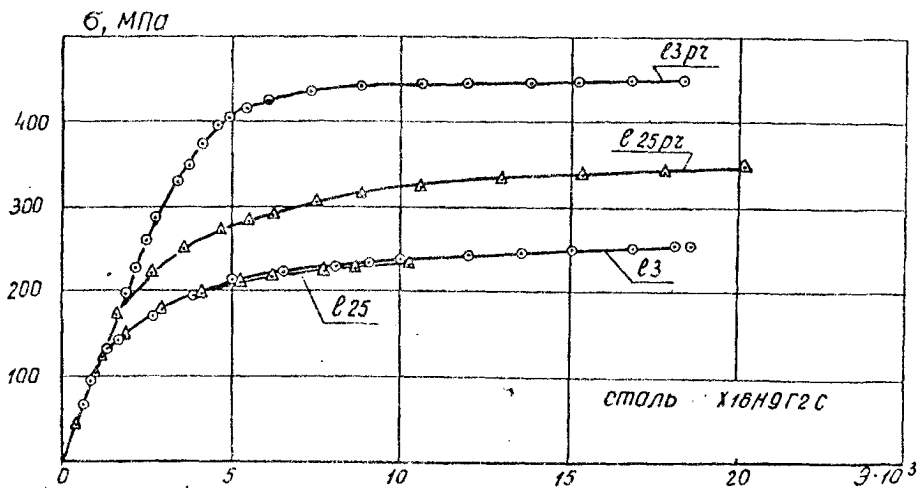


Рис. 2. Диаграммы деформирования материала при повторном простом растяжении

В то же время, наши эксперименты показали, что если диаграммы деформирования упрочняющегося материала при сложном непропорциональном нагружении строить в осях  $\sigma - S$ , то они весьма близки к зависимостям  $\sigma = \Phi(S)$  для простого процесса. Кроме того, необходимо отметить, что дополнительное упрочнение, приобретённое материалом в результате предварительного сложного нагружения, не приводит к существенному повышению таких прочностных характеристик материала, как, например, предел прочности. На рис. 3 приведены диаграммы деформирования материала оболочек при повторном простом растяжении в сопоставлении с исходной диаграммой растяжения материала (образцы e7, e14, e23)

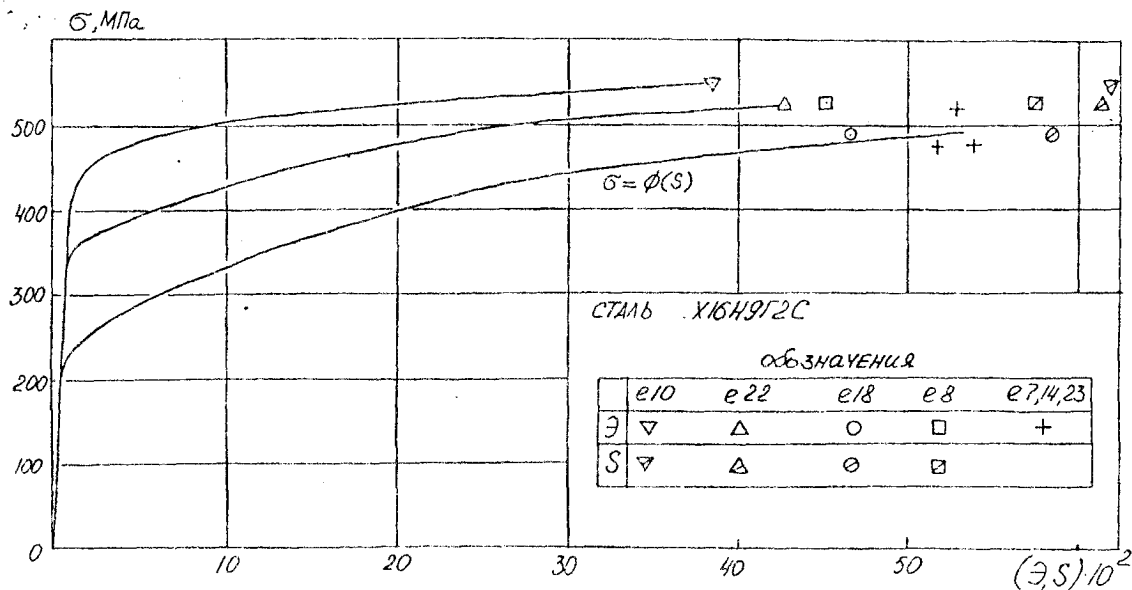


Рис. 3. Диаграммы деформирования материала

Символами на рисунке обозначены точки, соответствующие пределу прочности. Перечеркнутый символ отвечает значениям  $S$  с учетом длины дуги предварительно реализованного на данной оболочке сложного криволинейного процесса при постоянной кривизне  $\kappa_1$ . Опыты проводились до разрушения образцов. Деформации в данном случае вычислялись по перемещениям траверсы, поэтому их величины можно оценить только качественно. Тем не менее, очевидно, что деформации, соответствующие пределу прочности материала в исходном состоянии лежат в пределах диапазона изменения значений  $\mathcal{E}-S$  материала, подвергнутого предварительному сложному нагружению. Что касается оценки напряжений, то если на уровне 2% (величина  $\mathcal{E}^{\max}$  на траектории предварительного сложного процесса) величина модуля вектора напряжений (оболочка e10) на 74% выше значения  $\sigma$  на исходной диаграмме простого процесса, то значение предела прочности возросло только на 12% (исходное  $\sigma_{\text{пр}} \approx 489$  МПа - среднее по трем образцам e7, e14, e23). А для оболочки e22 (при большой кривизне траектории сложного деформирования) эти цифры составляют соответственно 43% и 6,7%. Таким образом, вместо термина «дополнительное упрочнение», применительно к поведению материалов на малоцикловых траекториях непропорционального деформирования, на наш взгляд,

более корректно было бы использовать термин «локальное дополнительное упрочнение», что вовсе не принижает значимость данного эффекта, в частности, например, для задач упругопластической устойчивости конструкций или решения иных проблем расчета и проектирования конструкций при малых упругопластических деформациях.

**3. Проверка физической достоверности гипотезы компланарности.** Эксперименты показали, что в виду  $\varepsilon_2 \neq 0$ , при деформировании по криволинейным траекториям в плоскости Э1-Э3 реализуются процессы малого кручения и произвольной кривизны [5]. Тем не менее, вследствие малости углов депланации данные процессы возможно описать определяющими соотношениями гипотезы компланарности [6].

Существенное значение в решении задач подобного рода играет правильность подбора аппроксимаций определяющих функций пластичности. Экспериментальные исследования показывают, что угол сближения  $\nu_1$  и функции  $N$  и  $d\sigma / dS$  на замкнутых криволинейных траекториях большой и средней кривизны, особенно если центр траектории не совмещен с центром координатной плоскости, после исчерпания следа запаздывания векторных свойств материала не остаются постоянными, а периодически изменяются, причем амплитуда их изменения существенно зависит от кривизны траектории и с ростом  $\kappa_1$  увеличивается. Поэтому аппроксимации, очевидно, должны учитывать как начальный этап деформирования в окрестности точки излома, так и режим установившегося процесса. Кроме того, на "установившемся" процессе функции пластичности, как следует из экспериментов, принимают максимальное значение при минимальной величине угла  $\nu_1$  и наоборот. Желательно также, чтобы уравнения для  $N$  и  $d\sigma / dS$  учитывали возможность реализации криволинейной траектории из начала координат и вариант изменения знака угла сближения в процессе деформирования, что может происходить при осуществлении некоторых типов криволинейных траекторий.

С учетом вышеизложенного в качестве одного из возможных вариантов аппроксимаций определяющих функций пластичности, принимаемых в рамках гипотезы компланарности, можно предложить [7]

$$N = 2G \left[ 1 - \omega (1 - f^q) \right] - \sigma_{\kappa_1} \left\{ (1 - \cos \nu_1) - (1 - 2 \cos \nu_1) \exp[-\gamma \cdot \Delta S] \right\}, \quad (2)$$

$$d\sigma / dS = \left[ d\Phi / dS - (2G + d\Phi / dS) f^p \right] + \sigma_{\kappa_1} \left\{ (1 - \sin \nu_1) - (1 - \sin \nu_1 + \cos \nu_1) \exp[-\gamma \cdot \Delta S] \right\}, \quad (3)$$

где  $f = (1 - \cos \nu_1) / 2$ . Здесь  $\Delta S$  отсчитывается от точки излома.  $G$ ,  $\omega$  - модуль сдвига и параметр пластичности материала соответственно, параметры  $p$  и  $q$  определяются из экспериментов на вереве многозвенных ломаных. При  $\kappa_1 = 0$  вторые слагаемые в (2), (3) пропадают, и приходим к соотношениям, хорошо зарекомендовавшим себя на многозвенных траекториях [6]. Параметр  $\gamma$  подбираем из условия  $\exp(-\gamma \cdot \Delta S) \approx 0$  в момент исчерпания следа запаздывания векторных свойств материала. Если криволинейная траектория выходит из начала координат ( $S_0 = 0$ ), полагаем  $\gamma = 0$ . При этом в расчетах для малоупрочняющихся при сложном нагружении материалов, в качестве универсальной, принимаем зависимость  $\sigma = \Phi(\varepsilon)$ , а для нержавеющей стали, что подтверждается экспериментами, - зависимость  $\sigma = \Phi(S)$  при простом нагружении.

На рис. 4 а, б показаны, в сопоставлении с экспериментальными данными, результаты решения задачи построения образа процесса нагружения для траектории

деформирования постоянной кривизны  $\kappa_1 = 161$ , реализуемой из начала координат в плоскости Э1-Э3 девиаторного пространства деформаций. Материал образца - сталь 45. Пройдено 3/4 полного витка траектории. В среднем по длине дуги реализованной траектории различие экспериментальных и расчетных величин компонент  $S_i$  не превышает 8%.

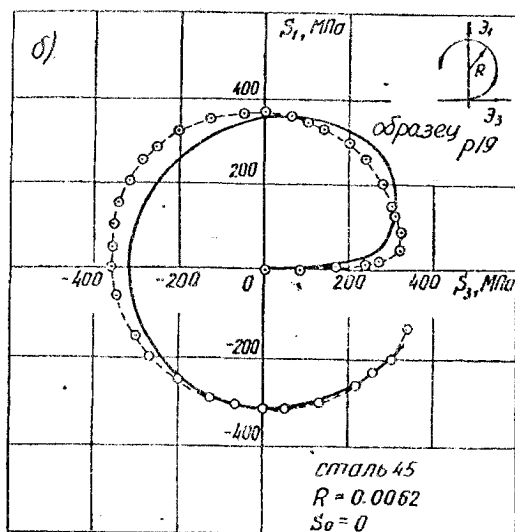
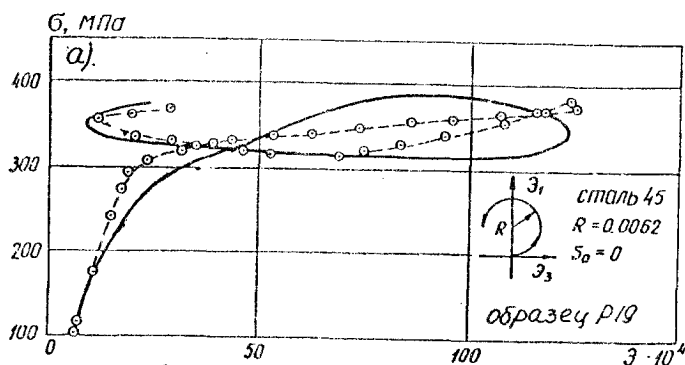


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов:  
(а) - траектории нагружения, (б) - диаграммы деформирования

На рис. 5 а, б показаны в сопоставлении с экспериментальными данными соответственно траектория нагружения и диаграмма деформирования, соответствующие траектории деформации стали Х16Н9Г2С, реализованной на оболочке еЗ. Пройдено три витка. Цифры в кружках на рисунке обозначают начало соответствующих витков. Различие расчетных и экспериментальных величин  $\sigma$  и компонент вектора напряжений  $S_i$  в целом по длине дуги траектории не превышает

10%, что лежит в рамках естественного разброса экспериментальных данных при простом нагружении для данного материала.

Таким образом, учесть эффект «дополнительного упрочнения» материалов при деформировании по замкнутым траекториям непропорционального нагружения с точностью, достаточной для инженерных расчетов, в первом приближении, можно и без введения дополнительных материальных функций в закон упрочнения. Данный результат подтверждается также при расчетах образа процесса нагружения стали Х16Н9Г2С на пространственных винтовых траекториях постоянной кривизны и кручения.

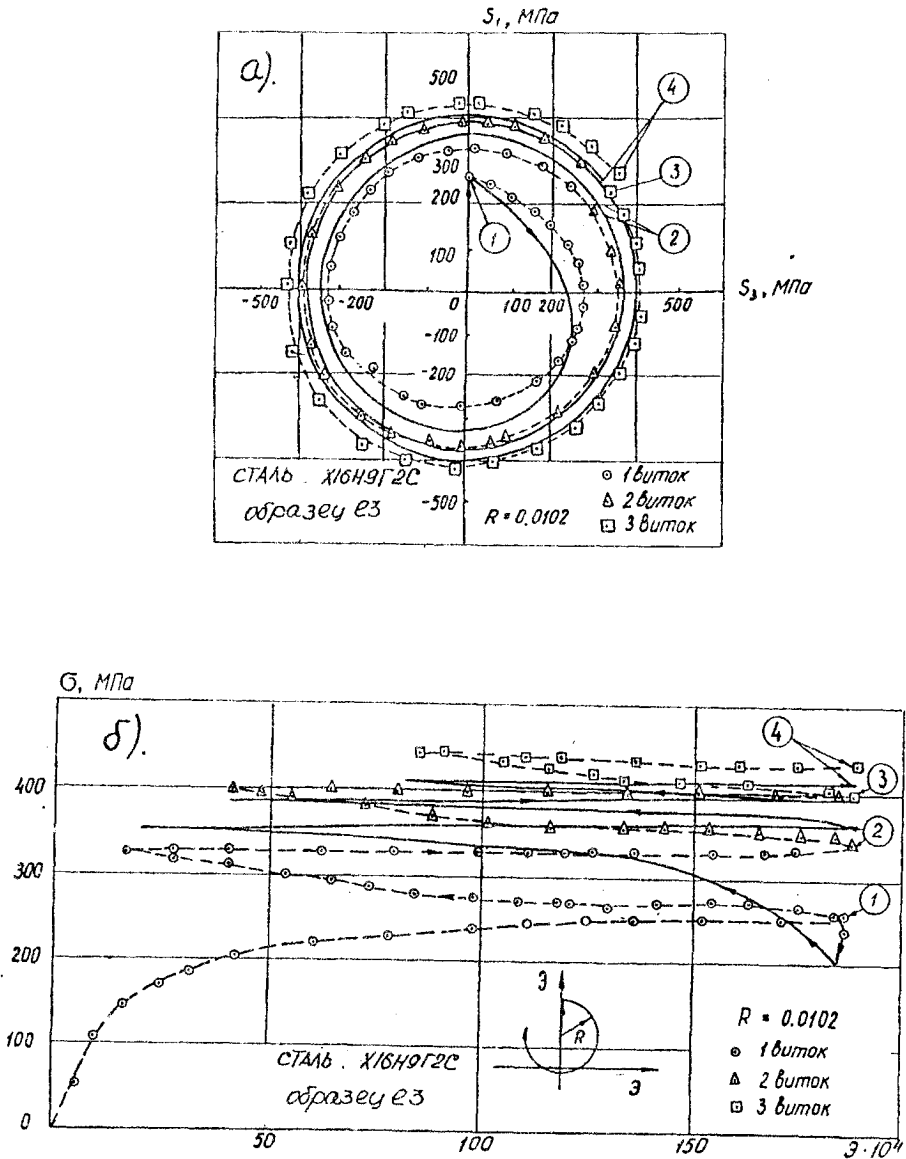


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных: (а) - диаграммы деформирования, (б) - траектории нагружения

**Библиографический список**

1. Трусов П.В., Келлер И.Э., Онискив Б.Д. Об определяющих соотношениях пластичности при циклическом непропорциональном нагружении // Математическое моделирование систем и процессов. Сб. науч. тр. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 1994. №2. - Вып. 2. - С. 90-102
2. Гохвельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. - М:Машиностроение, 1984. - 256 с.
3. Шукаев С.Н. Критерии предельного состояния металлических сплавов при двухосном малоцикловом нагружении. - Автореф. дисс. д. т. н. - Киев. 1996. - 32 с.
4. Зубчанинов В. Г. , Акимов А. В. и др. Разработка и создание системы автоматического управления, средств измерения усилий и деформаций, методик испытания и обработки результатов для трехкомпонентной экспериментальной установки на базе испытательной машины ЦДМУ-30// Отчет о НИР. Разработка и развитие экспериментальных методов исследования пластичности при простом и сложном нагружении. - Калинин: КПИ, 1989. - 33 с.
5. Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальное исследование процессов пластического деформирования металлов при сложном нагружении // IX конференция по прочности и пластичности. Труды.-М.: 1996.- Т. 1.- С. 86-92.
6. Зубчанинов В.Г. Об определяющих соотношениях теории упругопластических процессов // Прикладная механика, 1989.-Т.25.-№ 5.- С. 3-12.
7. Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Пластическое деформирование стали по замкнутым криволинейным траекториям // Проблемы прочности. 1996.- № 4.- С 19- 26.