

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Романов А.В.

АО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург, [Romanov\\_av2@power-m.ru](mailto:Romanov_av2@power-m.ru)

*Ключевые слова:* диаграммы деформирования, упругопластические свойства

Современное энергетическое оборудование достигло высоких параметров, что привело как к росту давлений и температур. Подгоняемые требованиями сетевых компаний производители оборудования стараются максимизировать ресурс оборудования, при этом минимизировав металлоемкость и себестоимость. Задачи эти противоречивы и требуют глубокого понимания как процессов, проходящих в рабочем теле установки, так и понимания поведения материалов, в том числе и вне привычной упругой области.

Становится невозможно продолжать проектировать оборудование опираясь на старые методики, основанные на расчетах в упругой постановке. Данные методики могут оказаться излишне консервативными и приводить к излишним капитальным затратам и, в конечном итоге, к убыткам.

С развитием промышленных CAE пакетов, таких как ANSYS, ABAQUS, NASTRAN и др., в мировой практике анализ поведения конструкций в упругопластической постановке давно уже стал привычным. Исследователи по всему миру пытаются разработать теорию, покрывающую максимальное число эффектов, возникающих при деформировании металлических сплавов, усложняя модели и уходя все дальше от возможности применить свои результаты на практике. С другой стороны предприятия нуждаются в простых, инженерных методиках, позволяющих получить недостающую информацию о поведении материалов за пределами упругости.

В данной работе показано применение нескольких методик построения диаграмм деформирования и проведено сравнение полученных диаграмм с результатами экспериментов для жаропрочного сплава и малолегированной стали.

Данные методики основываются исключительно на открытых источниках и доступны для повторения.

Среди источников, содержащих методики создания кривых деформирования, можно выделить справочник [1], статью [2], нормативные документы [3] и [4].

При этом источники [1], [2] и [3] содержат информацию о монотонных кривых, а [1], [3] и [4] циклические кривые.

Однако, данные о циклических кривых во всех источниках, кроме [4] содержатся в виде готовых коэффициентов, что не позволяет создать кривую под свой материал, а лишь воспользоваться максимально похожими свойствами.

Все из перечисленных источников достаточно авторитетны и, ссылаясь на собственный опыт, утверждают, что выведенными зависимостями можно пользоваться для создания диаграмм деформирования при отсутствии экспериментальных данных.

Для проверки близости полученных кривых к результатам эксперимента воспользуемся четырьмя экспериментальными диаграммами: две диаграммы для жаропрочного никелевого сплава при температурах 20 °С и 850 °С и две для низколегированной стали, полученные при 20 °С и 475 °С. Данные диаграммы (приведены на рис. 1) получены АО «НПО «ЦНИИТМАШ» по заказу АО «Силовые машины» и обработаны для получения истинных деформаций и напряжений.

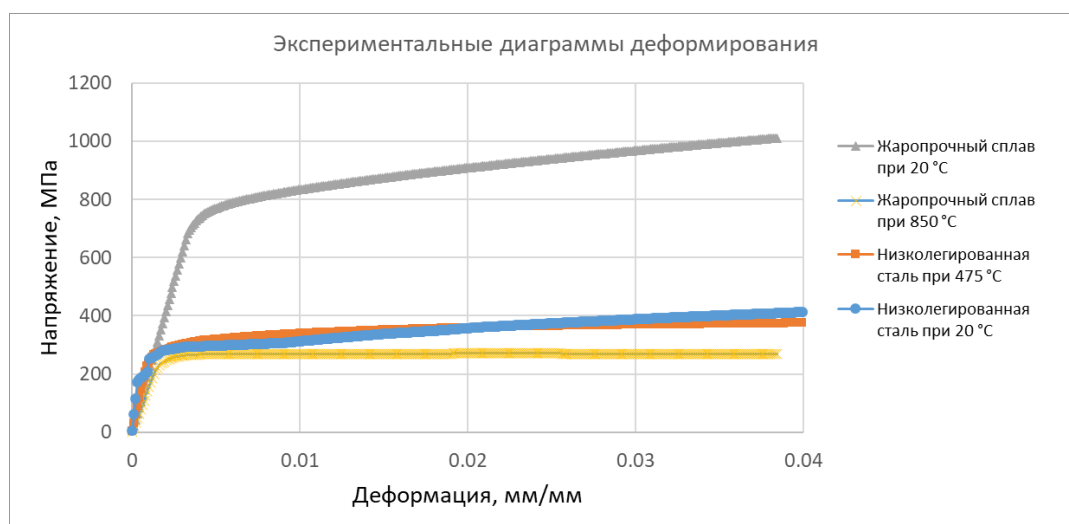


Рис. 1 – Диаграммы деформирования, использованные для проверки методик построения

Механические свойства, использованные при построении диаграмм показаны в табл.1.

Табл. 1. Механические свойства материалов, использованных при проверке аппроксимаций (статические)

Материал	Механические свойства				
	E, МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Жаропрочный сплав при 20°C	205464	781	1138	12.6	11.5
Жаропрочный сплав при 850°C	153753	256	262	25.3	28.0
Низколегированная сталь при 20°C	204000	292	472	34.0	81.0
Низколегированная сталь при 850°C	172000	280	360	32.0	86.0

Уравнения, аппроксимирующие диаграмму деформирования, выглядят следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K_0}\right)^{\frac{1}{m_0}}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E}, & \text{при } 0 < \sigma < \sigma_{\text{пц}} \\ \frac{\sigma}{E} + 0.002 * \left(\frac{\sigma - \sigma_{\text{пц}}}{\sigma_{0.2} - \sigma_{\text{пц}}}\right)^N, & \text{при } \sigma_{\text{пц}} \leq \sigma \leq \sigma_B \end{cases} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\varepsilon_1}{2}(1.0 - \tanh(H)) + \frac{\varepsilon_2}{2}(1.0 + \tanh(H)) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{1 + \vartheta}{1.5E} \sigma, & \text{при } \sigma < \bar{\sigma}_T^{\text{II}} \\ A\sigma^\mu, & \text{при } \sigma \geq \bar{\sigma}_T^{\text{II}} \end{cases} \quad (4)$$

Полное описание параметров уравнений можно найти в соответствующих документах: уравнение (1) – [1], (2) – [2], (3) – [3], (4) – [4].

Уравнения (1) – (4) являются вариантами уравнения Рамберга – Озгуда, при этом отличаясь способами вычисления параметров. При этом, уравнения (2) и (4) требуют для расчета наличия данных о пределе пропорциональности, который отсутствует в большей части справочной литературы, также уравнение (2) использует при вычислении коэффициента упрочнения относительную деформацию, что может давать неточности при значительной пластической деформации с образованием шейки. Еще одной особенностью уравнения (3)

является привязка параметров к группе материалов с ограничением максимальной температуры, что может существенно сказаться на точности аппроксимации.

Графики, показывающие сравнение различных методов построения диаграмм приведены на рис.2 по рис.5. Кривая, построенная по методике, описанной в РТМ [4] приведена для примера, так как является циклической диаграммой деформирования и в отборе не участвовала.

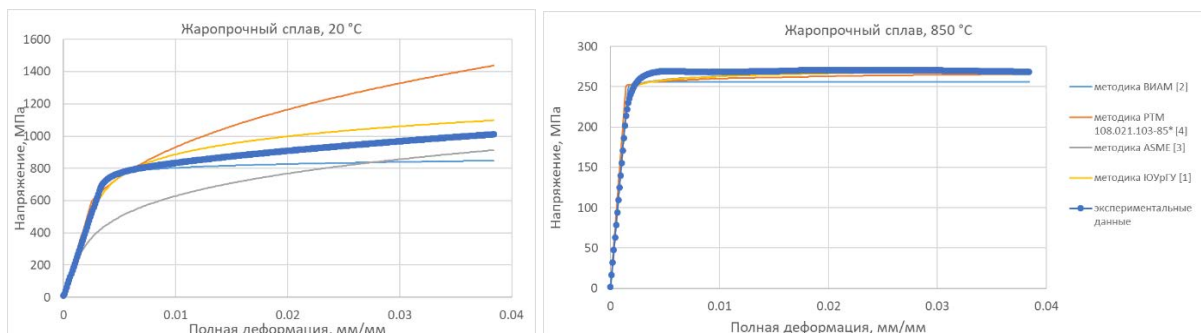


Рис.2 и 3 – Диаграммы деформирования, построенные для жаропрочного сплава при температуре 20°C и 850°C

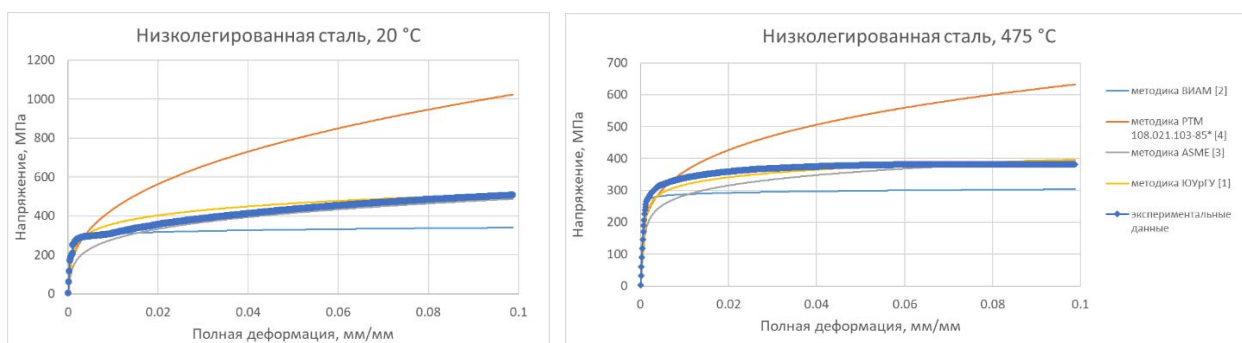


Рис. 4 и 5 – Диаграммы деформирования, построенные для низколегированной стали при температуре 20°C и 475°C

Табл. 2. Величина  $r^2$  для различных вариантов кривых

Источник	Методика ЮУрГУ [1]	Методика ВИАМ [2]	Методика ASME [3]
Жаропрочный сплав, 20°C	0.98	0.93	0.90
Жаропрочный сплав, 850°C	0.99	0.99	0.99
Низколегированная сталь, 20°C	0.93	0.58	0.98
Низколегированная сталь, 475°C	0.95	0.86	0.86

В результате проведенной работы выбран метод построения диаграмм деформирования по справочным данным дающий наибольшую точность аппроксимации экспериментальных данных (Табл. 1), а именно метод описанный в [1].

### Список литературы

1. Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б. и др. «Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении». Справочник. Екатеринбург: УрО РАН, 1996.
2. Банкина О.С., Дзюба А.С., Хватан А.М. Метод построения диаграммы деформирования « $\sigma - \epsilon$ » по справочным механическим характеристикам материала.
3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code, Section VIII, division 2. Alternative rules.
4. РТМ 108.021.103-85 Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость.

### **Сведения об авторе**

Романов Александр Викторович, начальник группы прочности статора. Область научных интересов: динамика и прочность газотурбинных двигателей.

## **THE COMPARISON OF DIFFERENT ANALYTICAL METHODS STRASS-STRAIN CURVES DEVELOPMENT**

Romanov A.V.

JSC «Power machines», Saint Petersburg, Russia, [Romanov\\_av2@power-m.ru](mailto:Romanov_av2@power-m.ru)

*Keywords: stress-strain curve*

The main topic of this sheet is comparison of different methods of stress-strain curves development with experimental data, received by simple tension tests. During this study the best method, giving the best precision was chosen. The same time, this paper contains description of several methods for strass-strain curve development based on simple reference literature.