

# ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМОВОССТАНОВЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ НАВЕДЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБОМ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ.

Коротницкий А. В.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Москва, Россия, [akorotitskiy@rambler.ru](mailto:akorotitskiy@rambler.ru)

Одно из основных функциональных свойств сплавов с памятью формы (СПФ), определяющих их рабочий потенциал – это величина деформации, которая может быть восстановлена при нагреве (эффект памяти формы, ЭПФ) или при разгрузке (эффект сверхупругости) после некоторой исходной (наведенной), деформации. Поскольку все функциональные свойства СПФ – структурно-чувствительные, эффективным способом управления комплексом свойств – служит термомеханическая обработка (ТМО). Практическая задача обработчика, заключается в установлении режимов ТМО для получения предельно высокого или требуемого комплекса функциональных свойств (например: сочетания реактивного напряжения и обратимой деформации) СПФ. Поэтому, весьма важным является оперативность, малая металло- и трудоемкость испытаний материалов, а также достоверность получаемых при этом результатов.

Наиболее распространенным методом качественно-количественной оценки величины обратимой деформации является способ, основанный на изгибании протяженных образцов круглого и других сечений вокруг цилиндрических оправок разного радиуса  $R$ . При этом величина деформации изгибом определяется как  $\varepsilon = h/2R$ , где  $h$  – толщина образца. А величина обратимой деформации при нагреве ( $\varepsilon_r$ ) определяется как  $\varepsilon_r = (\varepsilon_i - \varepsilon_f)$ , где  $\varepsilon_i$  – наведенная деформация,  $\varepsilon_f$  – остаточная деформация после нагрева. В свою очередь,  $\varepsilon_i = (\varepsilon_t - \varepsilon_e)$ , где  $\varepsilon_t$  – полная деформация,  $\varepsilon_e$  – упругая деформация. Наводящую ЭПФ деформацию сплавов проводят вблизи температур начала мартенситных превращений ( $M_n$ ), определенных ранее (например, калориметрически). По получаемым зависимостям  $\varepsilon_r = f(\varepsilon_i)$  определяют основную характеристику формовосстановления – величину максимальной полностью обратимой деформации, или другими словами, максимальную деформацию, при которой степень восстановления формы  $\eta = \varepsilon_r / \varepsilon_i$  ещё близка к 1 (значения  $\varepsilon_r$ , отличающиеся от  $\varepsilon_i$  менее, чем на некоторый, заранее оговоренный допуск (например, 0.2%).

Однако данный метод имеет ряд существенных недостатков: схема деформации является сложно-сопоставимой с одноосным растяжением (сжатием); профиль образца в действительности полностью не повторяет профиль оправки; измерение радиуса кривизны методом сравнения с эталонным – также весьма грубо, ввиду неравномерности, получаемой на практике, кривизны образцов по длине; и наконец, для каждого уровня наведенной деформации ( $\varepsilon_i$ ) (т.е. для каждой точки графика зависимости «обратимая деформация ( $\varepsilon_r$ ) – наведенная деформация ( $\varepsilon_i$ )»), требуется использовать новый образец, что весьма металлоемко и не всегда удобно. Получение желаемой дискретизации наводимой деформации – также бывает довольно затруднительным.

Поэтому, была создана методика экспресс оценки степени восстановления формы в зависимости от величины наведенной деформации изгибом не требующая использования оправки и большого числа образцов.

Разработанная методика позволяет получить зависимость степени восстановления формы от величины наведенной деформации в широком диапазоне (от 0 до ~15%) одномоментно на одном образце. Такого рода процедура реализована за счет прецизионного поточечного анализа геометрической формы поверхностного слоя (кривизны про-

филя) одного образца в трех состояниях: исходном, после наведения деформации и после восстановления формы.

Длина образца ( $l_{\text{образца}}$ ) выбирается примерно равной 10–0 толщин образца ( $h_{\text{образца}}$ ).

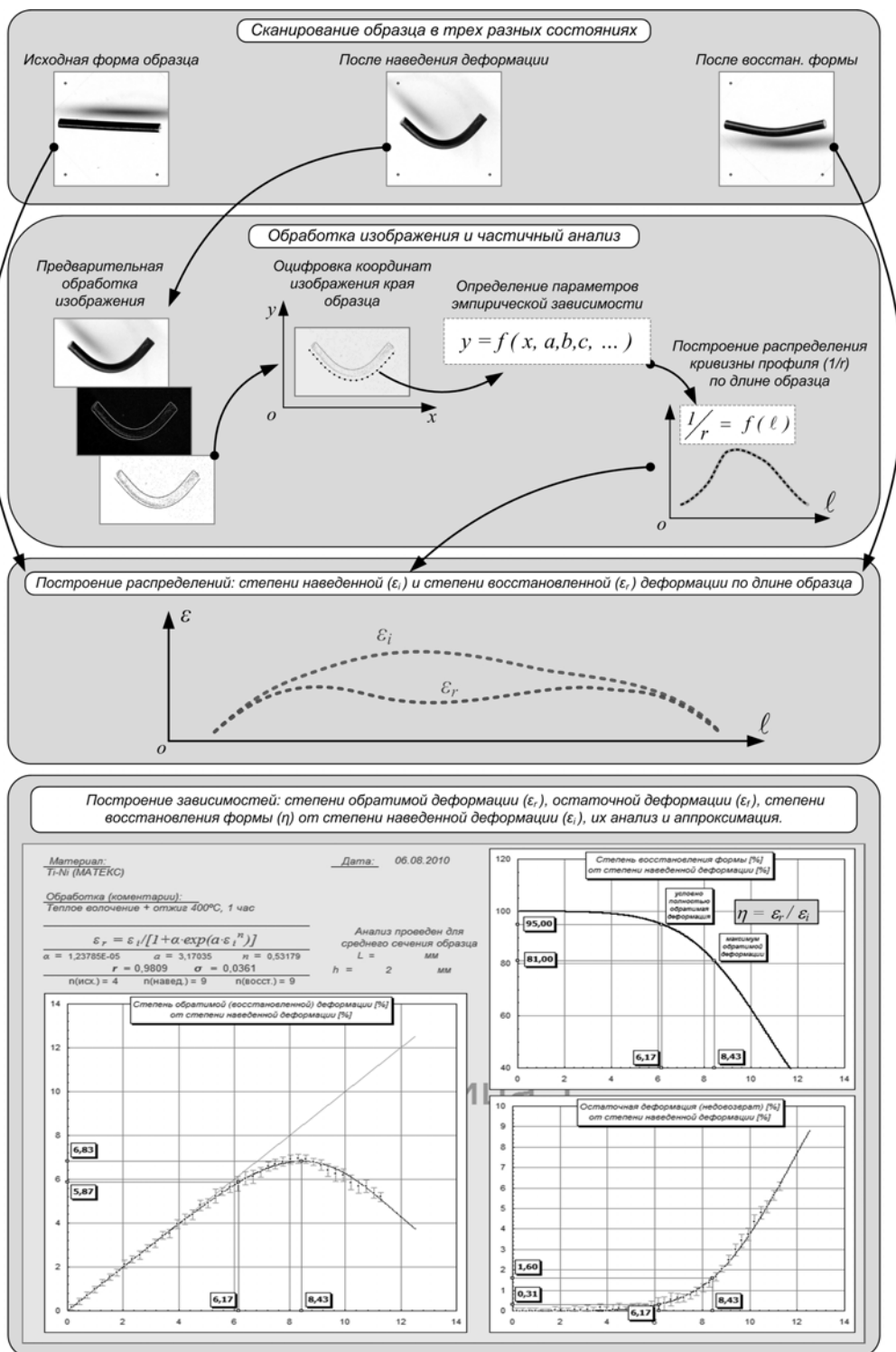


Рис. 1. К процедуре экспресс-оценки параметров формовосстановления

Следует отметить, что при деформировании (изгибании) образца нет необходимости использовать оправку. Образец деформируют, сводя концы до того момента, при котором в центральной области начинается пластическая деформация. Обычно, этот

момент можно почувствовать по резкому усилению сопротивления дальнейшему искривлению. Дальнейшая деформация – крайне нежелательна, т.к. приводит к существенному субструктурному изменению, а деформационный наклеп к изменению положения критических точек обратного мартенситного превращения.

Для получения характеристик формовосстановления нужно отсканировать (или сфотографировать) выбранную поверхность образца в одной и той же ориентировке, относительно других его поверхностей, в трех состояниях: исходном (1), после наведения деформации (2) и после восстановления формы (3), при этом температура образца при съемке ( $T_{\text{съемки}}$ ) должна быть выше  $M_S$ , но ниже  $A_S$  (т.е. между характеристическими температурами начала прямого и обратного мартенситного превращения). Профиль достаточно хорошо (коэффициент корреляции:  $r \geq 0.999$ ) описывается полиномом высоких степеней ( $\approx 5 \div 9$ ), поэтому статистически корректно иметь массив, объемом  $N \geq 500$ . Следовательно, разрешение сканера – ppi (тоже, что для принтера – dpi), необходимое для качественного анализа профиля должно составлять:

$$ppi \geq \frac{500}{l_{\text{образца}} / 25.4} \approx \frac{13 \cdot 10^3}{l_{\text{образца}}} \approx \frac{850}{h_{\text{образца}}}; \text{ где } [l_{\text{образца}}] - [\text{мм}] \text{ и } [h_{\text{образца}}] - [\text{мм}].$$

Если сканирование невозможно ввиду низкого (высокого) значения температуры  $T_{\text{съемки}}$ , тогда допускается его фотографирование с максимально возможным разрешением.

Сканирование или фотографирование объекта необходимо произвести на белом (контрастном образце) фоне, на котором имеются реперные точки (достаточно трех) задающие ортогональную систему координат и масштаб изображения.

Каждое изображение необходимо привести к черно-белому виду (см. рис.1), когда края (контур) образца контрастно выделяется на фоне (градиентная обработка), после чего, точки изображения, относящиеся к нижнему (или верхнему) краю образца нужно оцифровать (для достижения этих целей мы использовали программу «Digitize-Pro»), а полученный массив «X-Y» отправить на дальнейшую аналитическую обработку.

Разработанная Коротичким А.В. оригинальная компьютерная программа, позволяет произвести с данным массивом следующие операции (см. рис.1):

- 1) определение параметров оптимальной эмпирической зависимости, описывающей геометрические особенности профиля образца с автоматическим удалением «шумов» от шероховатостей на поверхности;
- 2) построение распределений: кривизны профиля ( $1/r$ ) по длине образца, степени наведенной ( $\varepsilon_i$ ) и степени восстановленной ( $\varepsilon_r$ ) деформации по длине образца;
- 3) построение зависимостей: степени восстановления формы ( $\eta$ ) и других характеристик формовосстановления от степени наведенной деформации ( $\varepsilon_i$ ) и их анализ;
- 4) графическое представление результатов эксперимента (см. рис.1).

В первом приближении небольшую (до 15%) пластическую деформацию СПФ можно рассмотреть как деформацию, реализуемую за счет двух независимых конкурирующих механизма (обратимого – за счет мартенситного превращения, и необратимого – скольжение дислокаций). Долю в наведенной деформации каждого механизма можно рассмотреть в рамках модели вероятностного преодоления потенциальных барьеров разной «высоты». При этом зависимость степени восстановления формы ( $\eta$ ) от степени наведенной деформации ( $\varepsilon_i$ ) можно описать следующим соотношением:

$$\eta = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_i} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \exp(a \cdot \varepsilon_i^n)}; \quad \text{где: } \alpha, a, n - \text{численные коэффициенты.}$$

Апробация данной методики на сплавах Ti–Ni показала хорошее согласование предсказанной зависимости с полученными экспериментальными данными.