

Особенности локализации деформации при термосиловой обработке

© 2021

Расторгуев Дмитрий Александрович^{*1}, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
*Семенов Кирилл Олегович*², аспирант кафедры «Оборудование и технологии
машиностроительного производства»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*E-mail: rast_73@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3097-4009>

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы обеспечения равномерности деформирования осесимметричных длинномерных образцов при термосиловой обработке (ТСО), которая заключается в одновременном приложении силового и температурного воздействий с целью комплексного улучшения геометрических характеристик и физико-механических параметров материала заготовки. Данная технология используется на различных стадиях технологических процессов изготовления деталей, но ее основная задача – обеспечение прямолинейности оси и заданного распределения остаточных технологических напряжений на заготовительном этапе. Недостаток ТСО – осевая деформация протекает неравномерно вдоль оси заготовки. Основным технологическим параметром – деформация, контроль которой является ключевым фактором, обеспечивающим эффективность ТСО. Проведено исследование распределения пластической деформации по участкам длинномерных заготовок с различной степенью деформации. Выполнена оценка равномерности деформирования по участкам заготовки с учетом того, на каком этапе зависимости «напряжение – деформация» находились образцы в конце цикла нагружения. На основе представлений о пластической деформации как автоволновом процессе выбран диапазон технологических режимов, соответствующий максимально однородному распределению деформации вдоль оси заготовки с полной проработкой всего объема заготовки. Этот диапазон соответствует этапу параболического упрочнения кривой пластического течения с образованием максимального количества стационарных очагов локализованной пластичности. Реологическое моделирование позволяет определять контрольные точки, задающие границы этапов кривой пластического течения при различных параметрах нагружения, включая температуру. Для повышения надежности определения фактической деформации в производственных условиях предлагается модернизация способа контроля процесса ТСО за счет фиксации деформации на ограниченном участке заготовки оптическим методом. Корректность данного подхода подтверждается статистическим анализом распределения деформаций по участкам для образцов. Использование предложенного способа контроля обеспечит достижение максимально равномерного распределения пластической деформации за счет гарантированного выхода деформации заготовки в диапазон значений деформаций, соответствующий этапу параболического упрочнения кривой пластического течения.

Ключевые слова: остаточные напряжения; пластическая деформация; термосиловая обработка; реологическая модель; кривая пластического течения; коэффициент локальности; оптический контроль.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90148.

Для цитирования: Расторгуев Д.А., Семенов К.О. Особенности локализации деформации при термосиловой обработке // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 2. С. 26–34. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-26-34.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение точности и качества заготовок является необходимым фактором повышения общей эффективности технологических процессов. Одним из технологических способов обеспечения необходимых конструктивных параметров и физико-механических свойств является использование термосиловой обработки (ТСО) заготовки [1].

ТСО характеризуется одновременным приложением силового и температурного воздействий [2]. Нагружение может вестись путем растяжения, сжатия, кручения или при комбинированных нагрузках. ТСО может распределяться по всей длине одновременно или по отдельным участкам. В качестве источника силы нагружения могут применяться как

внешние приводы (гидравлические^{1,2}, электромеханические³), так и силовые стапелы⁴, использующие разницу

¹ Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Репин К.А. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления: патент РФ № 2575510, заявка 10.09.2015, опубликовано 20.02.2016.

² Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Репин К.А. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления: патент РФ № 2615852, заявка 10.09.2016, опубликовано 11.04.2017.

³ Расторгуев Д.А., Семенов К.О. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей: патент РФ № 2632748, заявка 03.08.2017, опубликовано 09.10.2017.

⁴ Драчев О.И., Репин К.А. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления: патент РФ 2645235, заявка 02.11.2016, опубликовано 19.02.2018.

температурных деформаций установки для закрепления заготовки и самой заготовки для создания сил нагружения за счет разницы температурных деформаций стапеля и заготовки [3].

ТСО является комплексной операцией, которая формирует и геометрическую точность, и набор физико-механических свойств [4]. На заготовительном этапе формируется прямолинейность оси заготовки, задается уровень и характер распределения остаточных технологических напряжений. Данная технология значительно упрощает проведение последующей механической обработки за счет формирования равномерного припуска.

Использование альтернативного варианта – правки изгибом или поверхностным пластическим деформированием с точки зрения обеспечения стабильности свойств нерационально [5]. После правки обеспечивается прямолинейность, но в поперечном сечении заготовки остаточные технологические напряжения будут иметь разные по знаку значения. В дальнейшем, при снятии припуска, равновесное состояние нарушается при перераспределении напряжений, что ведет к короблению заготовки. Предложенная в [6] структура усовершенствованного технологического процесса включает в себя на начальном этапе термосиловую правку, а правка поверхностным пластическим деформированием является финишной операцией технологии, направленной на обеспечение размерной стабильности.

Изменение остаточных напряжений и фиксация прямолинейности обеспечивается при выходе деформации заготовки в зону текучести. Осевые пластические деформации сопровождаются поперечными. При неравномерности осевых пластических деформаций продольный профиль заготовки также будет иметь погрешность, что приведет к неравномерности припуска вдоль оси заготовки.

Для обеспечения равномерности распределения пластических деформаций вдоль оси заготовки необходим их контроль и управление ими. Но в производственных условиях эта задача имеет сложности в реализации. Контроль деформации заготовки по смещению захватов отличается неточностью. Величина фактической пластической деформации заготовки кроме влияния температурного фактора трудноопределима из-за большой контактной деформации в стыках между захватами и опорной поверхностью заготовки, а также общей деформации элементов силового контура для фиксации заготовки. Значительное влияние оказывает температурное воздействие (распределение температуры нагрева вдоль оси заготовки). Нагрев заготовки из-за особенностей подвода и отвода тепла происходит неравномерно, что определяет по длине заготовки переменные базовые температурно зависящие параметры материала (модуль упругости, предел текучести).

Использование тензоизмерительной аппаратуры в производственных условиях при нагреве установки в печи является нерациональным и сложным способом контроля. Контактные методы, при их точности, значительно усложняют и удорожают технологию ТСО. Для бесконтактного контроля процесса деформирования в настоящее время широко применяется оптический

метод контроля распределения деформаций с использованием цифровой обработки изображений методом корреляции [7–9].

Все исследования по локализации деформаций на основе принципов мезомеханики основаны на применении оптических методов определения полей распределения деформаций [10]. Как показывают результаты исследований в области мезомеханики, определяющим фактором в распределении пластических деформаций по длине заготовки является характер пластического течения, который имеет автоволновой характер [11–13]. Локализация деформаций по длине образца определяется особенностями автоволнового пластического течения и стадией деформационного упрочнения, которой достигает процесс деформирования при ТСО. В данных исследованиях, как правило, изучается деформация плоских образцов небольших размеров на ограниченной площади поверхности [14].

В [15] размер зоны локализованной деформации имеет величину порядка 150–360 мкм. Авторы связывают его с размерами группы зерен деформируемого материала. В [16] приводится пример контроля деформаций с использованием ее видеофиксации на этапе образования шейки в закритической области деформации при растяжении. В [17] локализация на мезоуровне рассматривается с максимальным шагом 5 мм и определяется параметрами зерен (их размерами и распределением предела текучести). В [18] на основе метода корреляции цифровых изображений получены распределения деформаций при растяжении плоских титановых образцов на измерительной базе 0,28 мм.

При реализации ТСО для длинномерных круглых образцов задача сводится к определению фактической пластической деформации с тем, чтобы гарантированно войти в заданный диапазон, в котором равномерность распределения деформаций максимальная. При этом все участки должны выйти в заданный диапазон для максимально полной проработки объема заготовки с целью создания «технологического» барьера на пути передачи исходных погрешностей заготовки на готовое изделие. Использование оптического способа контроля фактической деформации по всей длине заготовки обеспечило бы наиболее объективную информацию для комплексной оценки равномерности деформации в режиме реального времени. Но закрытая рабочая зона в стапеле не позволяет осуществлять непосредственный контроль процесса деформации оптическим способом по всей длине заготовки.

Необходимо выбрать величину деформации, которая с учетом автоволновых процессов обеспечила бы максимально равномерное распределение пластических деформаций по длине заготовки и возможность их контроля при ТСО с максимальной достоверностью. Возникает задача обосновать возможность контроля общей деформации образца с выходом на заданную стадию деформирования по наблюдению за деформацией его участка.

Цель исследования – обеспечение гарантированного выхода удлинения вала при ТСО в оптимальный диапазон пластических деформаций с их максимально равномерным распределением на основе контроля деформаций небольшого участка заготовки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования по технологии ТСО для изучения равномерности деформирования проводились для образцов из сплава 12Х18Н10Т. В эксперименте были постоянными следующие факторы: скорость нагрева до температуры деформирования, температура деформирования и скорость охлаждения до комнатной температуры, скорость деформирования. Переменный фактор – степень деформации. Температура нагрева заготовки $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Физико-механические свойства 12Х18Н10Т при $300\text{ }^{\circ}\text{C}$: модуль упругости $E=1,9\cdot 10^5$ МПа; предел текучести $\sigma_T=160$ МПа; коэффициент линейного расширения $\alpha=17,2\cdot 10^{-6}$ $1/^{\circ}\text{C}$. Величина относительной пластической деформации ε задавалась в интервале от 0,34 до 6%. Образец – пруток с длиной деформируемой части 1200 мм и диаметром 30 мм. Количество образцов для проведения испытаний – 16 шт. На каждом образце наносились 20 риска через каждые $60\pm 0,01$ мм, глубиной 0,2–0,4 мм и шириной 0,5–1 мм. Перед началом испытаний измерялось расстояние между соседними рисками.

Цикл испытаний заключался в нагреве образца до $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительное температурное удлинение при этом составляло 0,39% при абсолютном удлинении 4,97 мм. Далее производилось растяжение с заданной скоростью и величиной, затем охлаждение до $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее измерялось расстояние между соседними рисками.

Особенности процесса деформации зависят от участка кривой «деформация – напряжение» и меняются при переходе от участка к участку [19]. Из рассмотрения исключается участок упругой деформации, учитываются следующие этапы. I этап – участок полочки текучести, или участок легкого скольжения, которому соответствует формирование уединенного очага локальной деформации. Далее следуют участки упрочнения. II этап – участок линейного упрочнения, на котором происходит движение нескольких нестационарных очагов деформаций. III этап – участок параболического упрочнения, на котором происходит формирование эквидистантных очагов локальной деформации.

На рис. 1 приведены графики экспериментальных кривых «деформация – напряжение» для сплава 12Х18Н10Т для различных температур с указанными стадиями пластического течения. Они соответствуют дискретному изменению показателя параболичности n в уравнении, аппроксимирующем кривую пластического течения:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0 + Q \cdot \varepsilon^n,$$

где σ – напряжение, МПа;
 ε – деформация;
 Q – показатель упрочнения;
 σ_0 – предел текучести, МПа.

В соответствии со стадией пластического течения показатель параболичности n принимает следующие значения: $n \approx 0$ на площадке текучести, $n \approx 1$ на стадии легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения, $n \approx 1/2$ на стадии параболического упрочнения.

Проводить экспериментальные исследования по определению зависимостей «напряжение – деформация» при различных температурах трудоемко. Для определения стадии пластического течения по положению фактической величины пластической деформации относительно контрольных точек, которые определяют границы этапов кривой пластического течения, предлагается использовать расчет деформации с температурно зависимыми параметрами на основе реологических моделей А.Ю. Ишлинского. Методика расчета и пример ее применения представлены в [20]. Учет силовых и температурных факторов проводится не только через влияние температуры на температурную деформацию, но и через ее влияние на модуль упругости и предел текучести.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты моделирования температурно зависимых кривых «напряжение – деформация» по реологической модели А.Ю. Ишлинского показаны на рис. 2.

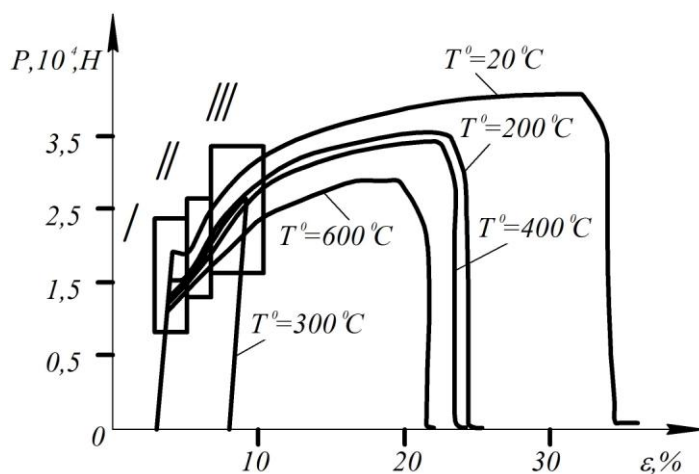


Рис. 1. График зависимости «деформация – напряжение» сплава 12Х18Н10Т при 20, 200, 300, 400, 600 °С
 Fig. 1. Stress-strain dependence diagram of the 12Х18Н10Т alloy at 20, 200, 300, 400, 600 °С

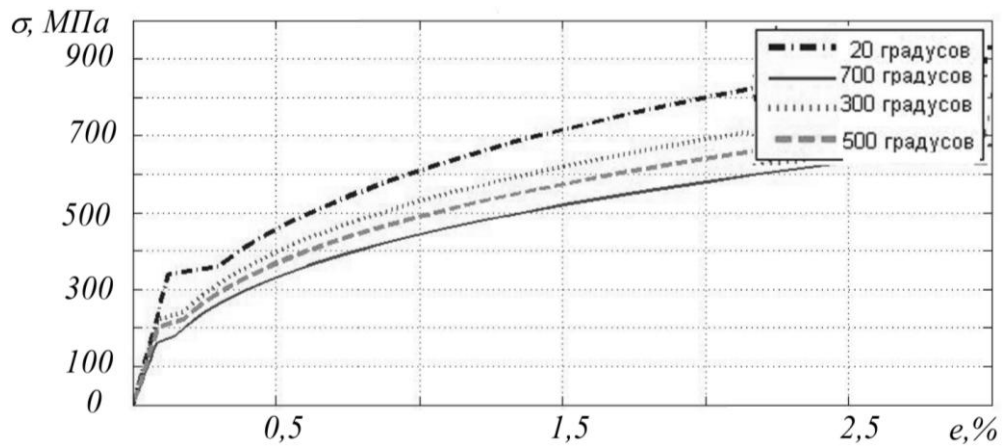


Рис. 2. Результаты моделирования зависимости «напряжение – деформация» для стали 12Х18Н9Т при температурах 20, 300, 500 и 700 °С
Fig. 2. The results of stress-strain dependence modeling for the 12Х18Н9Т steel at the temperature of 20, 300, 500, and 700 °С

На следующих рисунках представлены результаты распределения деформаций образцов по участкам в разном формате. Диаграмма на рис. 3 показывает величину накопленных отклонений деформаций $\sum \Delta e$ от среднего значения e_{cp} по участкам по всем образцам, которые находились на II этапе пластического течения (формирование нескольких нестационарных фронтов волн пластической деформации).

Частота соответствия величины деформации участка стадии пластического течения (II, III этапы) представлена в таблице 1.

Параметры деформаций по участкам для всех образцов в виде диаграммы размахов, сгруппированных по стадиям пластического течения, показаны на рис. 4. Для анализа распределения пластических деформаций были построены их плотности распределения, сгруппированные по этапам (рис. 5) и по укрупненным участкам образцов (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из сравнения экспериментальных кривых и результатов моделирования (рис. 1 и рис. 2), реологическая модель дает возможность получать зависимости «напряжение – деформация» с учетом температурного влияния с высокой точностью. Это позволяет определить граничные точки этапов деформации при переменных условиях нагружения.

Полученные распределения деформаций для анализа их равномерности сгруппированы в соответствии со стадиями пластического течения. Каждой стадии пластического течения соответствует определенный паттерн локализации пластической деформации [19]. На площадке текучести происходит движение фронтов, разделяющих упруго и пластически деформированные объемы, т. е. имеются недеформированные пластически участки заготовки. На стадии легкого скольжения

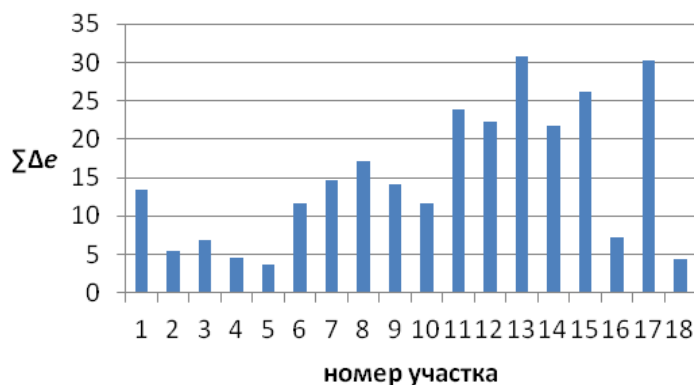


Рис. 3. Накопленная величина отклонения деформации от средней деформации на участках для всех образцов (II стадия пластического течения)
Fig. 3. The cumulative value of deformation deviation from the average deformation at the sections for all samples (II plastic flow stage)

Таблица 1. Частота соответствия величины деформации участка стадии пластического течения (для II, III этапов)
Table 1. The frequency of correspondence of a section deformation value of the plastic flow stage (for II, III phases)

| Стадии | Участки | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| II | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 1 | 0,8 | 1 | 0,6 | 1 | 1 | 0,6 | 1 | 1 | 0,8 | 0,4 | 1 | 1 | 0,8 | 0,4 |
| III | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,4 |
| Среднее правильных исходов | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,4 |

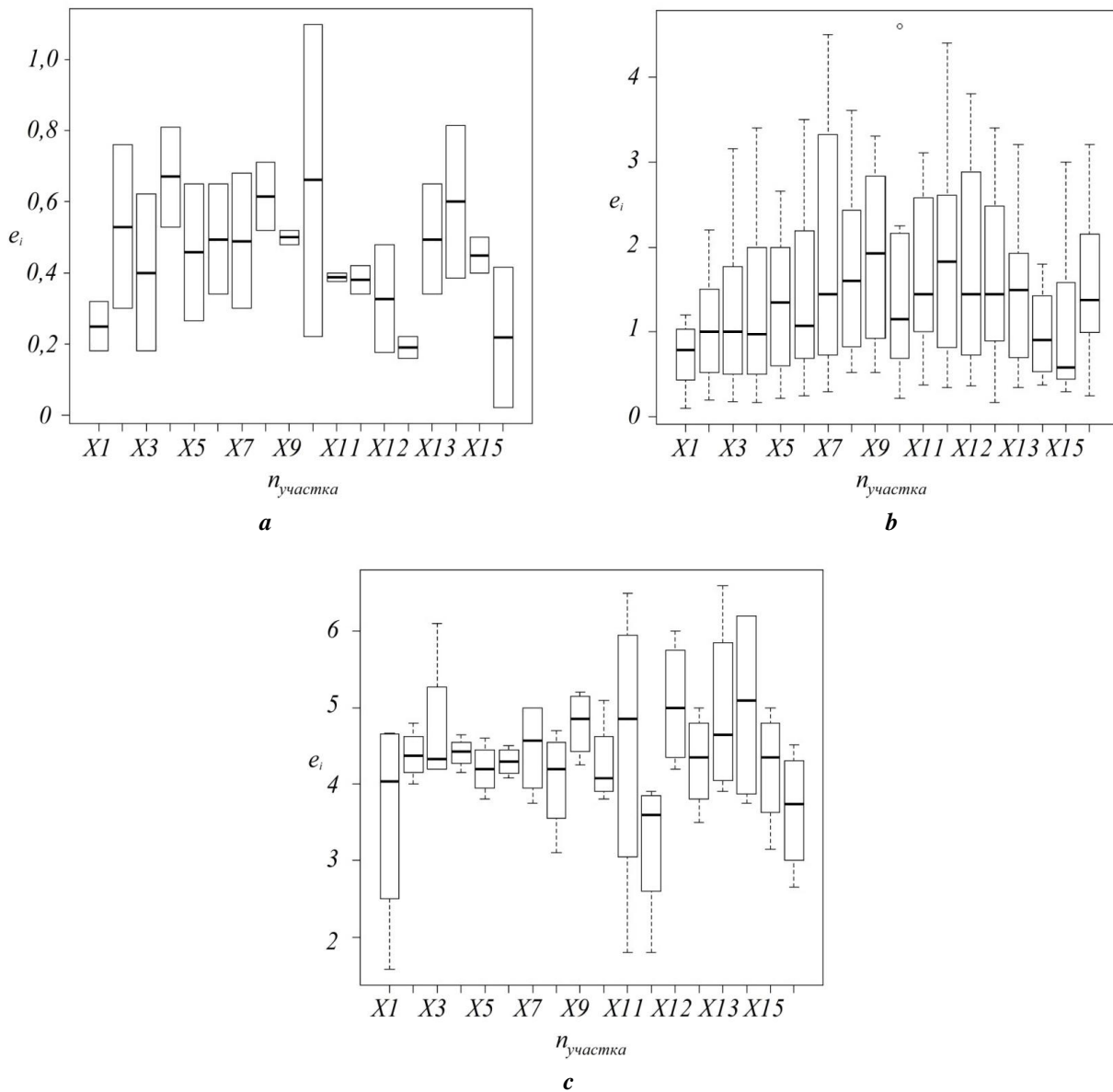


Рис. 4. Диаграмма размахов деформаций по участкам: а – I этап; б – II этап; с – III этап
Fig. 4. The box plot of deformations over the sections: a – I stage; b – II stage; c – III stage

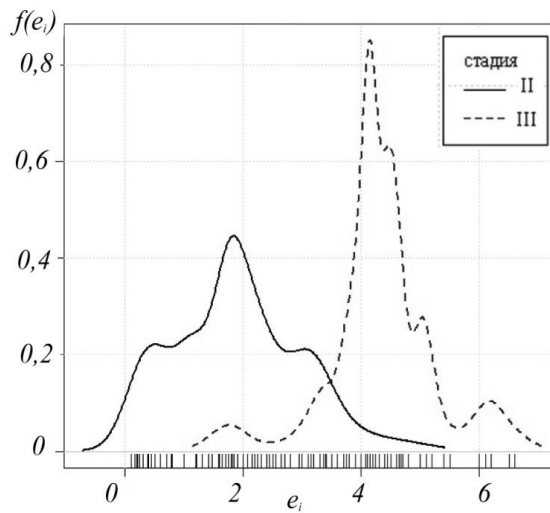


Рис. 5. Плотность распределения пластических деформаций по II и III этапам
Fig. 5. The density of plastic deformations distribution for II and III stages

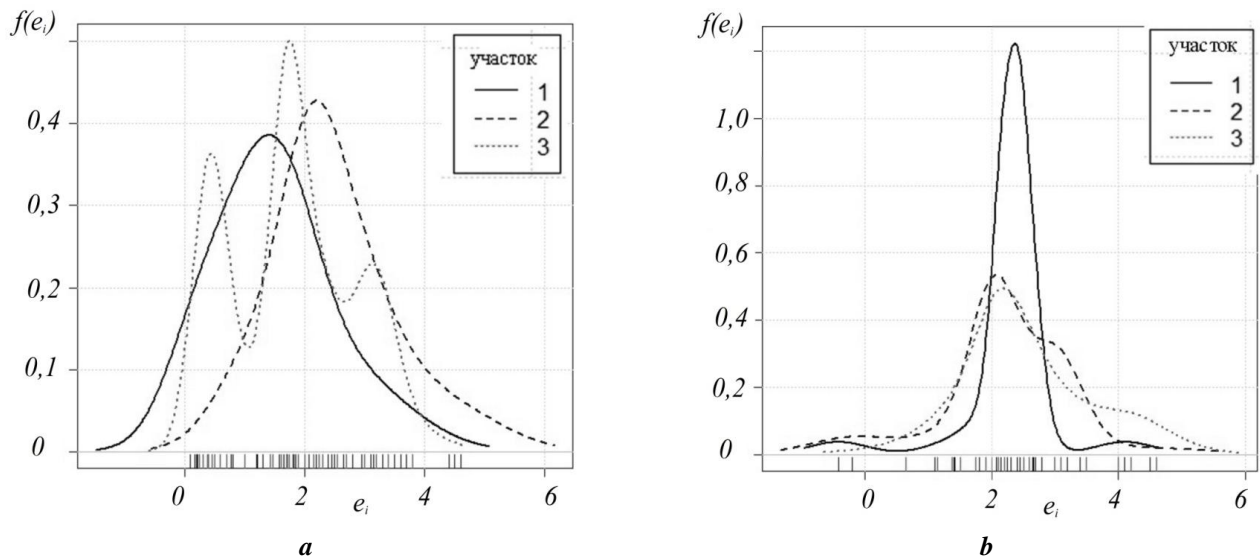


Рис. 6. Плотность распределения пластических деформаций, сгруппированная по длине по этапам:
 а – II этап; б – III этап. Участок: 1 – левая часть вала; 2 – середина вала; 3 – правая часть вала
Fig. 6. The density of plastic deformations distribution grouped by length for stages:
 а – II stage; б – III stage. Section: 1 – axis left part; 2 – axis center; 3 – axis right part

и линейного деформационного упрочнения происходит движение нескольких фронтов с увеличением их количества к концу стадии (от 2–3 до 5–10). На стадии параболического деформационного упрочнения происходит формирование стационарной системы очагов деформации. До стадии предразрушения, где происходит слияние очагов деформации с образованием шейки, при ТСО доходить нельзя. При переходе от одной стадии к другой происходит перестройка паттерна через разрушение старого, хаотизацию картины пластического течения и формирование нового паттерна.

Степень локализации по участкам, т. е. неравномерности деформации, снижается с ростом деформации.

Данные по локализации деформации при росте средней величины противоречивы. В [15] она растет вместе со средней величиной деформации по трехстадийной схеме. На первой стадии деформация однородная и мало отличается от среднего значения. Далее идут этапы макролокализации с образованием сначала длинной, затем короткой «шеек». В [16] были построены распределения продольных деформаций для образцов различной длины. Коэффициент локальности, как отношение максимальной продольной деформации к среднему значению, до момента образования шейки практически не зависит от длины образца, а место образования шейки располагается в центральной части образцов. При

росте деформации плотность распределения деформаций расширяется и отличается от закона нормального распределения [18].

Как показали результаты предыдущих исследований, максимальная степень однородности по различным критериям оценки обеспечивается на III этапе кривой пластического течения (этап параболического упрочнения).

Для исключения ошибки по определению стадии кривой пластического течения, на которой находится образец во время термосиловой обработки, был проведен анализ соответствия величины деформации каждого участка средней величине деформации всего образца. Из графиков (рис. 4) можно определить расположение участков для данных условий обработки, которые дают наименьшую величину ошибки и степень отклонения от среднего значения. Это участки 2–5, 16, 18. При сопоставлении рис. 4 и данных таблицы 1 видно, что фактическое соответствие обеспечивается для 16 участка. Для участков 2–5 оно значительно меньше.

Распределение зон локализации пластической деформации определяется длиной волны пластической деформации, которая логарифмически зависит от длины образца L :

$$\lambda(L) = \alpha \ln \frac{L}{L_0},$$

где α – масштабный коэффициент;
 L_0 – минимальный размер образца, в котором возможно возникновение локализации пластического течения.

С учетом размеров образцов (1200 мм) длина волны составляет порядка 32 мм. Длина контрольных участков соответствует двум длинам волн (~60 мм).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Коэффициент локальности при растяжении цилиндрических образцов, кроме влияния погрешностей диаметральных размеров, исходной кривизны, неоднородности свойств материала, их размеров, будет определяться стадией деформационного упрочнения, до которой доходят в каждом из циклов обработки. При этом для определения стадии пластического течения необходимо учитывать нагрев заготовок и температурное влияние на кривую упрочнения.

Участки, где величина деформации соответствует этапу пластического течения, до которого они были растянуты, расположены по всей длине образцов и не зависят от накопленной величины отклонения деформации участка от средней деформации. Равномерность по длине обеспечивается при выходе на параболический участок кривой пластического течения, где формируется установившаяся картина распределения максимального количества фронтов локализации пластической деформации. С выходом на данную стадию пластического течения наблюдается сужение плотности распределения деформаций. Контроль деформации заготовки бесконтактным способом возможен при условии выбора длины участка не менее двух длин волн, что обеспечивает при проведении ТСО выход в рабочий диапазон деформаций с формированием максимально равномерного распределения деформаций по длине.

Анализ существующих способов и устройств для ТСО свидетельствует или об отсутствии контроля процесса формирования пластических деформаций в режиме реального времени, или о его неэффективности из-за сложности реализации традиционными методами.

Проведена статистическая оценка возможности прогнозирования стадии кривой пластического течения при нагружении всего образца по величине деформации отдельного участка заготовки. Она необходима для гарантированного выхода на стадию кривой пластического течения, при которой формируется максимальное количество установившихся очагов пластической деформации и обеспечивается ее максимальная равномерность. На данном этапе происходит параболическое упрочнение с формированием максимального количества стационарных очагов локализованной пластичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драчев О.И. Бессиловая и термосиловая обработка высокоточных деталей. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 244 с.
2. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей. М.: Политехника, 2005. 289 с.
3. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Повышение эффективности обработки маложестких валов при комбинированном термосиловом нагружении // *Металлообработка*. 2012. № 3. С. 30–35.
4. Драчев О.И. Исследование влияния термосиловой обработки на эксплуатационные характеристики маложестких осесимметричных деталей // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2017. № 5. С. 14–17.
5. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Влияние технологической наследственности напряженно-деформированного состояния на точность нежестких деталей // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2020. № 1. С. 56–64.
6. Мураткин Г.В. Процессы образования и снижения технологических остаточных деформаций нежестких деталей // *Металлообработка*. 2019. № 6. С. 17–26.
7. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer, 2009. 321 p.
8. Любутин П.С., Панин С.В. Измерение деформации на мезоуровне путем анализа оптических изображений поверхности нагруженных твердых тел // *Прикладная механика и техническая физика*. 2006. Т. 47. № 6. С. 158–164.
9. Надеждин К.Д., Шарнин Л.М., Кирпичников А.П. Визуальные методы определения деформаций и напряжений на поверхности испытываемых конструкций // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19. № 12. С. 143–146.
10. Любутин П.С., Панин С.В., Титков В.В., Еремин А.В., Сундер Р. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2019. № 1. С. 88–109.

11. Зуев Л.Б. Автоволновая модель пластического течения // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 3. С. 85–94.
12. Зуев Л.Б. О волновом характере пластического течения. Макроскопические автоволны локализации деформации // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 3. С. 47–54.
13. Зуев Л.Б., Баранникова С.А. Автоволны локализации пластического течения. Скорость распространения, дисперсия и энтропия // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 112. № 2. С. 115–123.
14. Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Закономерности и схематизация процессов локализации пластического течения при испытании плоских образцов алюминий-магниевого сплава // Физическая мезомеханика. 2017. Т. 20. № 2. С. 71–78.
15. Теплякова Л.А., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А., Касаткина Н.Ф., Давыдова В.А. Закономерности локализации деформации на крупномасштабных уровнях в стали со структурой отпущенного мартенсита // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2000. Т. 5. № 2-3. С. 221–223.
16. Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Опытное изучение закономерностей закритического поведения с учетом неоднородности деформирования образца // Математическое моделирование в естественных науках. 2016. Т. 1. С. 549–553.
17. Полянский В.А., Беляев А.К., Грищенко А.И., Лобачев А.М., Модестов В.С., Пивков А.В., Третьяков Д.А., Штукин Л.В., Семенов А.С., Яковлев Ю.А. Моделирование полос локализации пластической деформации «шахматная доска» с учетом статистического разброса параметров зерен поликристалла // Физическая мезомеханика. 2017. Т. 20. № 6. С. 40–47.
18. Реков А.М., Вичужанин Д.И. Плотность распределения деформаций в плоскости образца ВТ1-00 при растяжении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 3. С. 53–60.
19. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность: Локализация и коллективные моды. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 208 с.
20. Григорьев А.К., Колбасников Н.Г., Фомин С.Г. Структурообразование при пластической деформации металлов. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 1992. 244 с.
21. Зуев Л.Б. Автоволновая модель пластического течения // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 3. С. 85–94.
22. Зуев Л.Б. О волновом характере пластического течения. Макроскопические автоволны локализации деформации // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 3. С. 47–54.
23. Зуев Л.Б., Баранникова С.А. Автоволны локализации пластического течения. Скорость распространения, дисперсия и энтропия // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 112. № 2. С. 115–123.
24. Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Закономерности и схематизация процессов локализации пластического течения при испытании плоских образцов алюминий-магниевого сплава // Физическая мезомеханика. 2017. Т. 20. № 2. С. 71–78.
25. Теплякова Л.А., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А., Касаткина Н.Ф., Давыдова В.А. Закономерности локализации деформации на крупномасштабных уровнях в стали со структурой отпущенного мартенсита // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2000. Т. 5. № 2-3. С. 221–223.
26. Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Опытное изучение закономерностей закритического поведения с учетом неоднородности деформирования образца // Математическое моделирование в естественных науках. 2016. Т. 1. С. 549–553.
27. Полянский В.А., Беляев А.К., Грищенко А.И., Лобачев А.М., Модестов В.С., Пивков А.В., Третьяков Д.А., Штукин Л.В., Семенов А.С., Яковлев Ю.А. Моделирование полос локализации пластической деформации «шахматная доска» с учетом статистического разброса параметров зерен поликристалла // Физическая мезомеханика. 2017. Т. 20. № 6. С. 40–47.
28. Реков А.М., Вичужанин Д.И. Плотность распределения деформаций в плоскости образца ВТ1-00 при растяжении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 3. С. 53–60.
29. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность: Локализация и коллективные моды. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 208 с.
30. Григорьев А.К., Колбасников Н.Г., Фомин С.Г. Структурообразование при пластической деформации металлов. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 1992. 244 с.
31. symmetric parts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 5, pp. 14–17.
32. Muratkin G.V., Sarafanova V.A. The effect of the technological heredity of the stress–strain state on the accuracy of nonrigid parts. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, vol. 49, no. 1, pp. 45–50.
33. Muratkin G.V. The processes of formation and reduction in technological residual deformations of non-rigid parts. *Metalloobrabotka*, 2019, no. 6, pp. 17–26.
34. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer, 2009. 321 p.
35. Lyubutin P.S., Panin S.V. Mesoscale measurement of strains by analyzing optical images of the surface of loaded solids. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 905–910.
36. Nadezhdin K.D., Sharnin L.M., Kirpichnikov A.P. Visual methods of identifying deformations and stresses on the surfaces of tested structures. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 12, pp. 143–146.
37. Lyubutin P.S., Panin S.V., Titkov V.V., Eremin A.V., Sunder R. Development of the digital image correlation method to study deformation and fracture processes of structural materials. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2019, no. 1, pp. 88–109.
38. Zuev L.B. Autowave model of plastic flow. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 85–94.
39. Zuev L.B. On the wave character of plastic flow. Macroscopic autowaves of deformation localization. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 47–54.
40. Zuev L.B., Barannikova S.A. Autowaves of localized plastic flow, velocity of propagation, dispersion, and entropy. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 112, no. 2, pp. 109–116.
41. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Plastic flow localization processes and their schematization during testing of flat aluminum-magnesium alloy specimens. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 71–78.
42. Teplyakova L.A., Kozlov E.V., Ignatenko L.N., Popova N.A., Kasatkina N.F., Davydova V.A. Regularities of deformation localisation on large-scale levels in tempering martensite steel. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2000, vol. 5, no. 2-3, pp. 221–223.
43. Tretyakov M.P., Vildeman V.E. Experimental study of post-buckling regularities taking into account the deformation non-uniformity of a sample. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, 2016, vol. 1, pp. 549–553.
44. Polyanskiy V.A., Belyaev A.K., Grishchenko A.I., Lobachev A.M., Modestov V.S., Pivkov A.V., Tretyakov D.A., Shtukin L.V., Semenov A.S., Yakovlev Yu.A. Modeling of bands of chessboard-like plastic strain localization with regard to the statistical variability of polycrystalline grain parameters. *Fizicheskaya mezzomekhanika*, 2017, vol. 20, no. 6, pp. 40–47.
45. Rekov A.M., Vichuzhanin D.I. The density of deformation distribution in a plane of vt1-00 sample under uniaxial strain. *Vestnik Permskogo natsionalnogo*

REFERENCES

1. Drachev O.I. *Bessilovaya i termosilovaya obrabotka vysokotochnykh detaley* [Forceless and thermal power treatment of high-precision parts]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2019. 244 p.
2. Drachev O.I. *Tekhnologiya izgotovleniya malozhestkikh osesimmetrichnykh detaley* [The technique of manufacturing low-rigidity axisymmetric parts]. Moscow, Politekhnik Publ., 2005. 289 p.
3. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Increase of efficiency of processing of low-rigid shaft at the combined thermopower loading. *Metalloobrabotka*, 2012, no. 3, pp. 30–35.
4. Drachev O.I. The study of thermal power treatment influence on operational characteristics of low-rigidity axi-

- issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2018, no. 3, pp. 53–60.
19. Zuev L.B. *Avtovolnovaya plastichnost: Lokalizatsiya i kollektivnye mody* [Auto-wave plasticity: Localization and collective modes]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2019. 208 p.
20. Grigorev A.K., Kolbasnikov N.G., Fomin S.G. *Strukturoobrazovanie pri plasticheskoy deformatsii metallov* [Structure-formation at plastic deformation of metals]. Sankt Petersburg, Sankt-Peterburgskiy universitet Publ., 1992. 244 p.

Special aspects of strain localization during thermal power processing

© 2021

*Dmitry A. Rastorguev**¹, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”

*Kirill O. Semenov*², postgraduate student of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

*E-mail: rast_73@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3097-4009>

Abstract: The paper considers the issues of ensuring the uniformity of strain of axisymmetric long-dimensional samples during thermal force processing (TFP), which is the simultaneous application of force and temperature effects for comprehensive improvement of geometric characteristics and physical and mechanical parameters of the workpiece material. This technology is used at various stages of technological processes of parts manufacturing, but its main task is to ensure the axis straightness and the specified distribution of residual technological stresses at the procuring stage. The disadvantage of TFP is that the axial deformation proceeds nonuniformly along the workpiece axis. The core process parameter is the deformation, the control of which is a key factor ensuring the TFP efficiency. The authors studied the plastic strain distribution over the sections of long-length workpieces with different deformation degrees. The study involved the assessment of strain uniformity over the workpiece sections, taking into account the stage of the stress-strain relation at the end of the loading cycle. Based on the concepts of plastic deformation as an auto-wave process, the authors selected the range of technological modes corresponding to the most uniform strain distribution along the workpiece axis with complete processing of the entire workpiece volume. This range corresponds to the stage of parabolic hardening of the plastic flow curve with the formation of the maximum number of stationary zones of localized plasticity. Rheological modeling allows identifying the control points that specify the boundaries of the plastic flow curve stages at various loading parameters, including temperature. To improve the reliability of determining the actual deformation under production conditions, the authors proposed modernizing the TFP process monitoring method by fixing the deformation on a limited workpiece section using the optical technique. The statistical analysis of the strain distribution over the sections for the samples confirms the correctness of this approach. The application of the proposed control method will ensure the most uniform distribution of plastic deformation due to the reliable enter of the workpiece deformation to the range of strain values corresponding to the stage of parabolic hardening of the plastic flow curve.

Keywords: residual stresses; plastic strain; thermal power treatment; rheological model; plastic flow curve; locality coefficient; optical control.

Acknowledgements: The study is carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the scientific project No. 20-38-90148.

For citation: Rastorguev D.A., Semenov K.O. Special aspects of strain localization during thermal power processing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 2, pp. 26–34. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-26-34.