

УДК 621.77.014

Исследование теплового эффекта пластической деформации углеродистых сталей

Опенкова Екатерина Алексеевна

ekaterina.mospu@mail.ru

Петров Павел Александрович^(*)

petrov_p@mail.ru

SPIN-код: 6414-2654

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен процесс холодной пластической деформации углеродистой стали марки 20 и 45 при осадке цилиндрических образцов. На основе натурных и вычислительных экспериментов определен тепловой эффект. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки технологии получения неразъемных соединений заготовок разнородных углеродистых сталей пластической деформацией.

Ключевые слова: тепловой эффект, пластическая деформация, углеродистая сталь, компьютерное моделирование, адиабатические условия

Research into the thermal effect of plastic deformation of carbon steels

Openkova Ekaterina Alexeevna

ekaterina.mospu@mail.ru

Petrov Pavel Alexandrovich^(*)

petrov_p@mail.ru

SPIN-code: 6414-2654

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. The process of cold plastic deformation of carbon steel grades 20 and 45 during upsetting of cylindrical samples is considered. Based on natural and computational experiments, the thermal effect is determined. The results obtained are of practical importance for the development of technology for obtaining permanent connections of blanks of dissimilar carbon steels by plastic deformation.

Keywords: thermal effect, plastic deformation, carbon steel, computer modeling, adiabatic conditions

Введение. В процессе пластической деформации в очаге деформации наблюдается тепловой эффект, приводящий к локальному повышению температуры металла. В адиабатических условиях повышение температуры может быть определено по формуле [1]:

$$\Delta T = \frac{\eta'(1-\varphi)}{c\rho} \int_0^{t_k} \sigma_i \dot{\epsilon}_i dt, \quad (1)$$

где η' — адиабатический поправочный коэффициент, определяющий соотношение между фактическим повышением температуры элементарного объ-

ема и повышением температуры в адиабатических условиях [2]; φ — коэффициент, определяющий долю работы пластической деформации, затрачиваемую на эволюцию микроструктуры, принимается от 0 до 0,1; c — удельная теплоемкость; σ_i — интенсивность напряжения текучести; $\dot{\epsilon}_i$ — интенсивность скорости деформации. Для адиабатических условий $\eta' = 1$ и значение φ в формуле (1) принимается равным 0,1.

Цель данной работы — изучение теплового эффекта пластической деформации при холодном пластическом формоизменении заготовок углеродистых сталей с содержанием углерода от 0,1 до 0,45 %.

Материалы и методы. Методика эксперимента предполагает проведение параллельного эксперимента — натурного и вычислительного с применением компьютерной программы QForm [3], основанной на теории течения и решающей краевую задачу обработки давлением с применением метода конечных элементов. Исследуемые материалы: 1) углеродистая сталь 20; 2) углеродистая сталь 45. Размеры образцов, вырезаемых из прутка: диаметр $D = 28$ мм; высота $H = 54$ мм и диаметр $D = 25$ мм; высота $H = 48$ мм (рис. 1). В каждый образец устанавливается термопара. Учитывая, что образцы имели разную исходную высоту в зависимости от марки материала, расположение термопары (h_n) выбрано исходя из подобия геометрических размеров (рис. 1). Для стали 20 значение $h_n = 29,5$ мм; для стали 45 — $h_n = 26,0$ мм. Диаметр термопары ($d = 2,0$ мм) и глубина ее установки (8,0 мм) не зависят от материала образца. Для каждой марки стали изготовлено 3 образца.

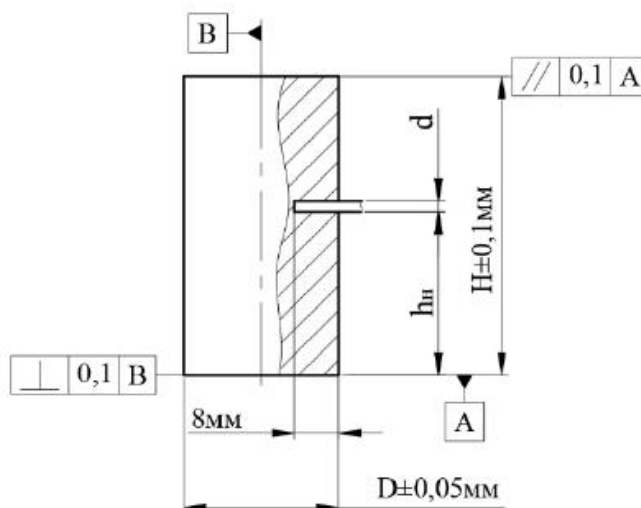


Рис. 1. Эскиз образца с термопарой для испытания

Цилиндрический образец из углеродистой стали подвергается сжатию между инструментами с плоскими рабочими поверхностями; подвижный инструмент перемещается на рабочем ходе со скоростью 1 мм/с. В каждый исследуемый образец устанавливается термопара до начала натурного эксперимента. Деформирование образца выполняется при комнатной температуре на величину 50 % от его исходной высоты с применением гидравлического

пресса номинальной силой 1,6 МН. В процессе непрерывного сжатия выполняется регистрация сигналов о силе деформирования и перемещении траверсы гидравлического пресса, а также о температуре внутри деформируемого образца.

Данные о натурном эксперименте передаются с датчиков через аналого-цифровую плату на персональный компьютер. Обработка данных об эксперименте выполняется с применением специализированного программного обеспечения и позволяет получить распределение температуры в деформируемом образце в зависимости от продолжительности рабочего хода.

Результаты. На рис. 2 показаны результаты натурного эксперимента — графики, отражающие взаимосвязь между силой деформирования, температурой в образце и временем, в течение которого выполнялась осадка цилиндрического образца.

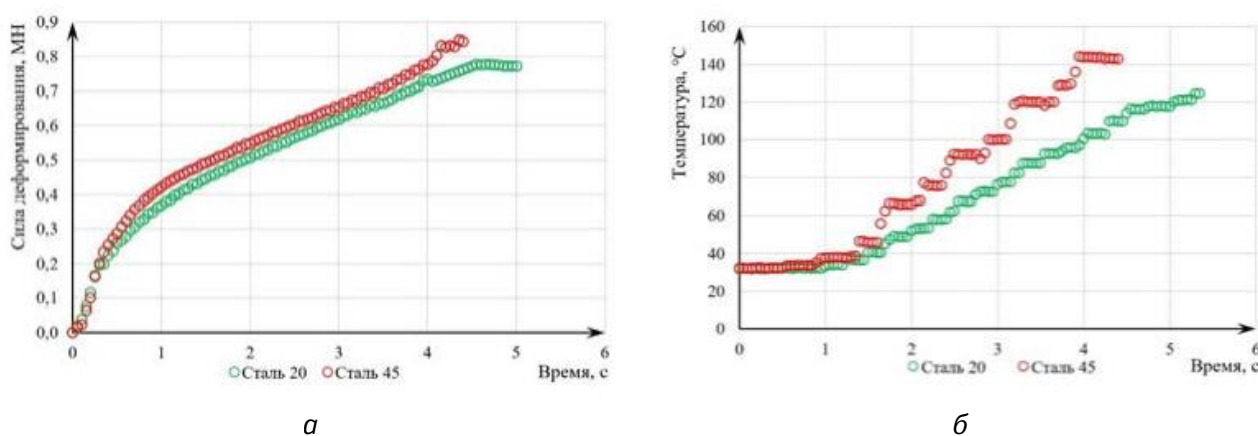


Рис. 2. Взаимосвязь параметров процесса осадки цилиндрических образцов в натурном эксперименте:

а — сила деформирования — время; *б* — температура — время

Обсуждение полученных результатов. Результаты, полученные в ходе выполнения натурного эксперимента, применяются для разработки его компьютерной модели с применением программы QForm. Вычислительный эксперимент проверяется на соответствие натурному по силе деформирования, по перемещению инструмента, а также по распределению температуры в образце. В целом, методика изучения теплового эффекта, отраженная в докладе Е.А. Опенковой (Галактионовой) и П.А. Петрова [4], позволяет получить данные, необходимые для установления взаимосвязи между приращением температуры (текущей температурой) углеродистой стали с различным процентным содержанием углерода от величины деформации. На рис. 3 показаны компьютерные модели виртуального эксперимента для стали 20 (рис. 3, *а*) и для стали 45 (рис. 3, *б*).

Расположение виртуальной термопары, соответствующее расположению натурной термопары (рис. 2), определяется в программе посредством задания трассируемой точки (рис. 3). В процессе осадки образца для виртуальной термопары на каждом шаге расчета определены значения текущей температуры и параметров напряженно-деформированного состояния. Результаты

измерения значений температуры в виртуальном эксперименте показаны на рис. 4. Графики на рис. 4 построены с учетом того, что осадка образцов стали 20 и стали 45 выполняется до достижения значения относительной деформации равного 45 %.

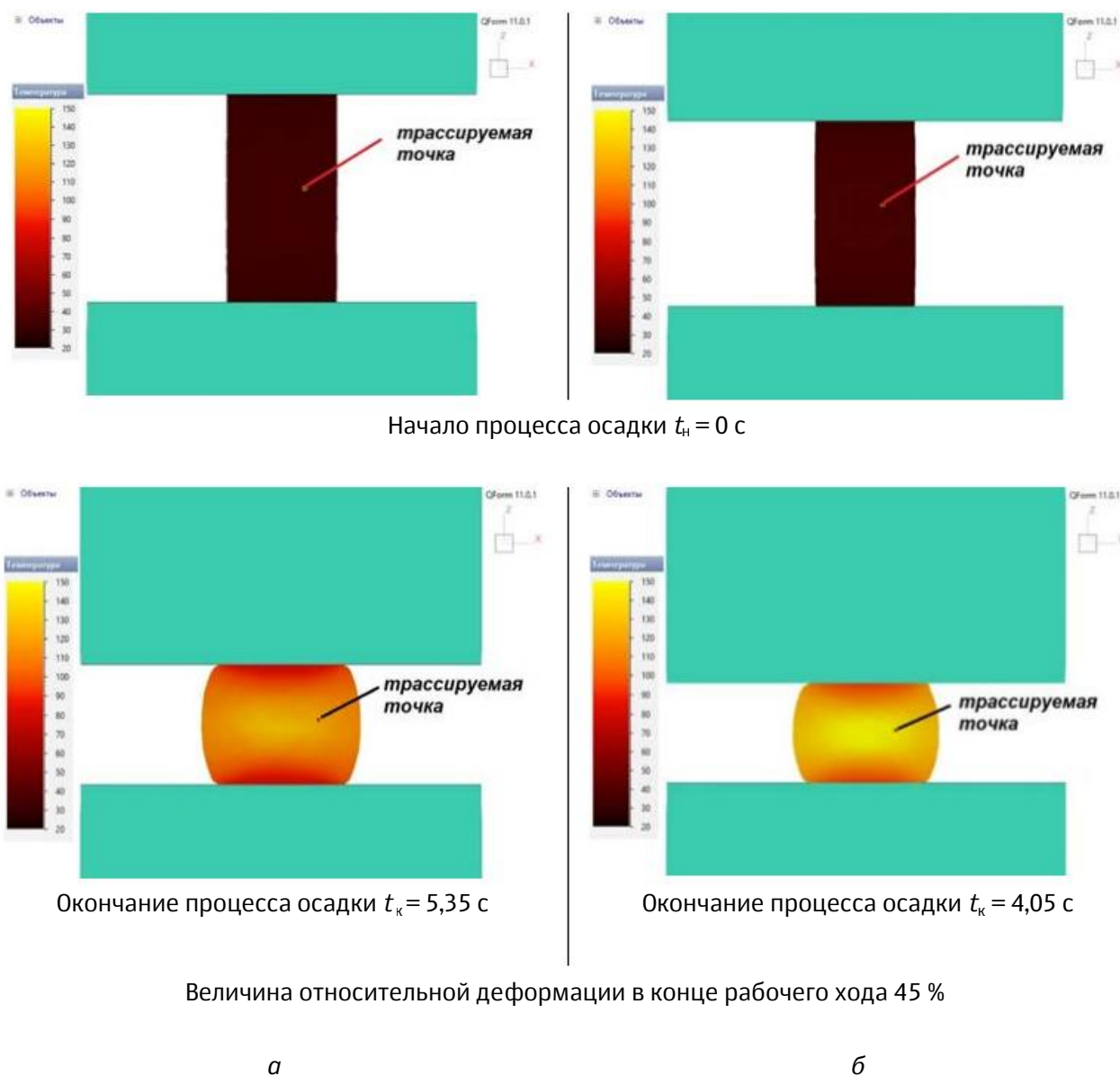


Рис. 3. Модель осадки цилиндрического образца в виртуальном эксперименте:
a — сталь 20; *б* — сталь 45

Сравнение значений измеренной температуры в натурном (рис. 2, истинное значение температуры) и вычислительном (рис. 4, расчетное значение температуры) экспериментах выполняется по величине относительной погрешности измерения (рис. 5) и величине средней абсолютной ошибки (MAE).

Среднее значение по медианному значению относительной погрешности измерения составляет: для стали марки 20 — 2,58 %; для стали марки 45 —

8,13 %. Значение MAE, определяемое в градусах по шкале Цельсия, составляет: для стали марки 20 — 6,03 °С; для стали марки 45 — 8,03 °С. Наибольшее значение относительной погрешности измерения наблюдается на начальном этапе рабочего хода инструмента в период по времени от $t_n = 0$ с до ~2,5 с.

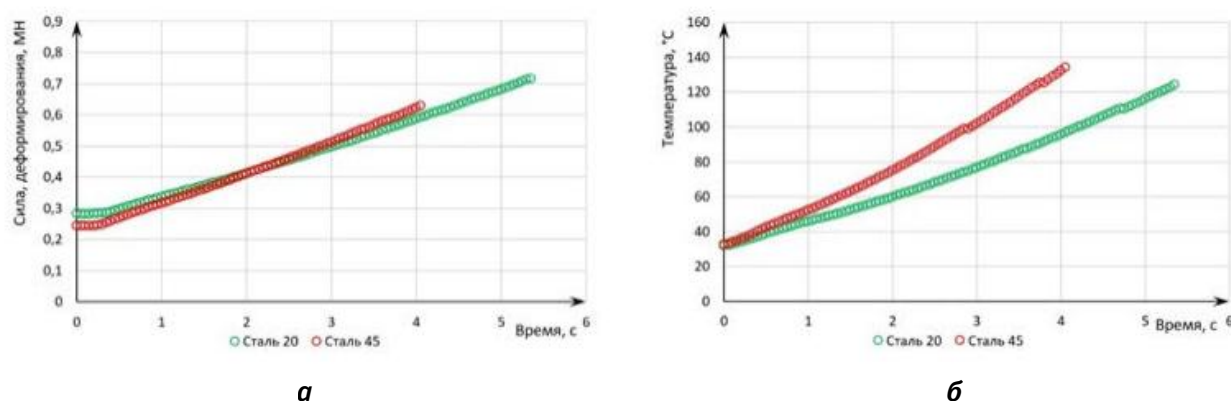


Рис. 4. Взаимосвязь параметров процесса осадки цилиндрических образцов в виртуальном эксперименте:

а — сила деформирования — время; *б* — температура — время

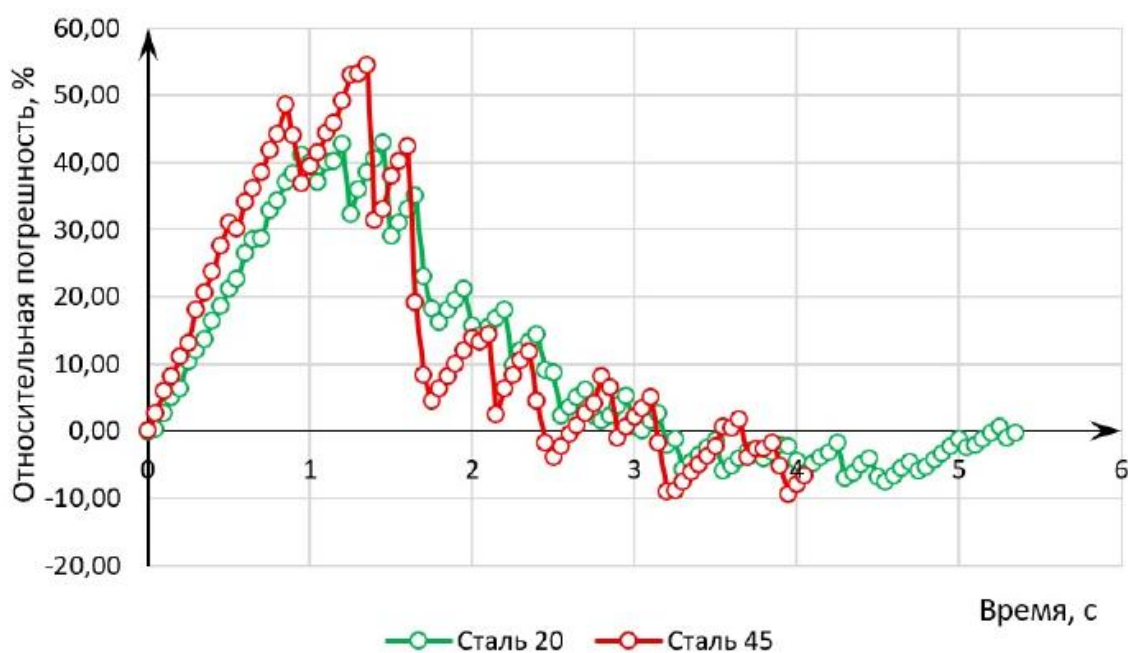


Рис. 5. Оценка виртуальной модели осадки по относительной погрешности измерения температуры

Закключение. В результате выполненного исследования определена величина теплового эффекта для адиабатических условий при пластической деформации образцов углеродистой стали марки 20 и 45. Результаты получены на основе натурных и вычислительных экспериментов; имеют практическое значение и могут быть использованы при разработке технологии изго-

товления неразъемных соединений заготовок двух углеродистых сталей пластической деформации в штампе с подогреваемым рабочим инструментом. Сравнение результатов натурального и вычислительного экспериментов позволяют сделать вывод об их достаточно хорошей сходимости по величине относительной погрешности измерения и величине МАЕ.

Список источников

- [1] Степанский Л.Г. *Расчеты процессов обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1979, 215 с.
- [2] Li S., Li L., He H., Wang G. Influence of the deformation heating on the flow behavior of 6063 alloy during compression at medium strain rates. *J. Mater. Res.*, 2019, vol. 34 (2), pp. 309–320.
- [3] Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. *Конечноэлементное моделирование технологических процессов ковки и объемной штамповки*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2019, 383 с.
- [4] Галактионова Е.А., Петров П.А. Разработка методики и проведение экспериментов по изучению теплового эффекта пластической деформации углеродистых сталей. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования, посв. 90-летию МГТУ им. Г.И. Носова. Междунар. науч.-техн. конф.: сб. докл.* Магнитогорск, 2024, 227 с.