

УДК 621.7

Экспериментальные исследования теплового эффекта при пластическом деформировании сталей 10 и 41Х1

Ушаков Александр Витальевич sasha_ushi@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования теплового эффекта при пластическом деформировании сталей 10 и 41Х1 при различных скоростях деформации. Установлены зависимости температуры, возникающей в заготовке, от степени деформации и скорости деформирования. Построены математические модели теплового эффекта при различных скоростях деформации, позволяющие количественно оценивать температурные приращения в процессе ХОШ. Полученные зависимости позволяют обоснованно корректировать температурные режимы подготовки заготовок и прогнозировать влияние теплового эффекта на интенсивность деформирования и стойкость инструмента.

Ключевые слова: холодная объемная штамповка, тепловой эффект, степень деформации, скорость деформирования, низкотемпературный нагрев, стойкость инструмента

Experimental research of the thermal effect during plastic deformation of steels

Ushakov Alexander Vitalyevich sasha_ushi@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of a study on the thermal effect during plastic deformation of steels 10 and 41X1 at various deformation rates. Dependencies of the temperature arising in the workpiece on the degree of deformation and deformation rate have been established. Mathematical models of the thermal effect at different deformation rates have been developed, allowing for a quantitative assessment of temperature increments during the cold bulk forming process. The established dependencies enable justified adjustment of preheating parameters and allow prediction of the thermal effect's impact on deformation intensity and tool life

Keywords: cold forming, thermal effect, degree of deformation, deformation rate, low-temperature heating, tool life time

В различных процессах обработки металлов давлением имеет место существенное влияние температуры нагрева заготовок на напряженное, деформированное состояние и энергосиловые параметры [1, 2]. При этом в некоторых работах отмечено, что предварительный низкотемпературный нагрев (до температур не более 350–400 °С) при холодной объемной штамповке сложнопрофильных деталей из углеродистых и легированных сталей, в том числе

нержавеющих и борсодержащих, позволяет снизить силы деформирования и, соответственно, нагрузки на инструмент в 2 и более раз [3–5].

При любой пластической деформации выделяется определенное количество тепла, дополнительно разогревающее деформируемый металл в очаге деформации. Этот процесс называется тепловой эффект деформации. Энергия, затрачиваемая на деформирование тела, расходуется на упругую и пластическую деформацию и на преодоление дополнительных напряжений. Энергия, затраченная на упругую деформацию, освобождается при разгрузке тела. Энергия, затраченная на преодоление дополнительных напряжений, остается в теле, а энергия, израсходованная на пластическую деформацию, превращается в теплоту. Тепловой эффект тем больше, чем больше скорость деформации, так как при малой скорости большое количество теплоты успевает рассеиваться в окружающую среду. Например, при скоростном деформировании дуралюмина, титановых сплавов температура металла может повыситься на $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1, 2].

Тепловой эффект обычно вызывает повышение пластичности и снижение сопротивления деформированию металла. Однако в тех случаях, когда в результате теплового эффекта сплав попадает в зону фазовых превращений или пережога, происходит охрупчивание сплава и повышение сопротивления деформированию [1, 2].

Для изучения теплового эффекта и определения зависимостей температуры нагрева заготовок от величины холодной пластической деформации, которые в дальнейшем можно использовать для корректировки температуры предварительного низкотемпературного нагрева заготовок перед холодной объемной штамповкой сложнопрофильных деталей, была разработана методика и проведены экспериментальные исследования по осадке цилиндрических образцов высотой 14 мм, диаметром 10 мм из сталей 10 и 41Х1. При этом проводили измерение температуры в очаге деформации образца с использованием цифрового термометра модели ТМ-902С: диапазон измерения температуры: от -50 до $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, тип термопары К (никель–хром/никель–алюминий), погрешность измерения: $\pm(0,75\text{ \% от показаний} + 1\text{ }^{\circ}\text{C})$. Термопара хромель–алюмель (тип К) является одной из наиболее широко применяемых в научных и промышленных измерениях температур. Она представляет собой соединение двух различных металлов: хромель (около 90 % никеля и 10 % хрома) и алюмель (около 95 % никеля с добавками алюминия, марганца и кремния).

Схема осадки образцов и общий вид используемой оснастки и образцов для проведения исследований приведены на рис. 1.

На рис. 2 приведен общий вид универсальной испытательной машины УТС-Р-250-0,5 с номинальной силой 250 кН, на которой проводили исследования по осадки образцов, а также общий вид размещения оснастки, образца и измерителя температуры на столе испытательной машины.

По результатам проведенных экспериментов были построены зависимости температуры T в очаге деформации образцов из сталей 10 и 41Х1 от логарифмической степени деформации ϵ_i образцов при осадке с различными скоростями деформации $\dot{\epsilon}' = 0,03\text{ с}^{-1}$ (скорость деформирования 28 мм/мин);

0,1 с⁻¹ (скорость деформирования 84 мм/мин); 0,3 с⁻¹ (скорость деформирования 255 мм/мин) и 0,4 с⁻¹ (скорость деформирования 330 мм/мин), представленные на рис. 3. Точками показаны экспериментальные значения температуры, линии — аппроксимирующие зависимости:

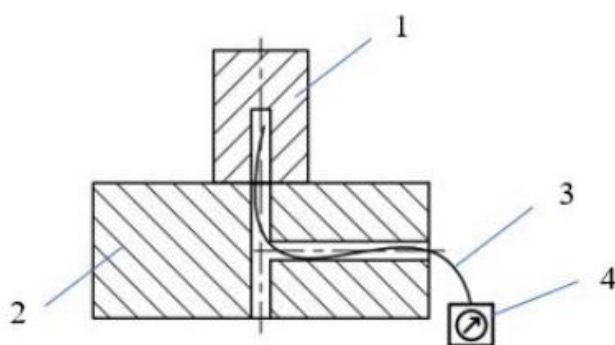
$$\epsilon' = 0,4 \text{ с}^{-1}: T = 84,007e_i^2 - 30,372e_i + 32,913 \text{ (для стали 10);}$$

$$\epsilon' = 0,3 \text{ с}^{-1}: T = -22,295e_i^2 + 111,1e_i + 11,814 \text{ (для стали 10);}$$

$$\epsilon' = 0,3 \text{ с}^{-1}: T = 38,606e_i^2 + 38,299e_i + 24,021 \text{ (для стали 41X1);}$$

$$\epsilon' = 0,1 \text{ с}^{-1}: T = 28,24e_i^2 + 30,522e_i + 21,54 \text{ (для стали 10);}$$

$$\epsilon' = 0,03 \text{ с}^{-1}: T = -34,787e_i^2 + 47,619e_i + 21,596 \text{ (для стали 10).}$$



а



б

Рис. 1. Схема осадки образцов (а) и общий вид используемой оснастки и образцов (б):

1 — образец; 2 — нижняя плита с отверстиями для размещения термопары; 3 — термопара; 4 — измеритель температуры



а



б

Рис. 2. Универсальная испытательная машина УТС-Р-250-0,5 (а) и размещения оснастки, образца и измерителя температуры на столе испытательной машины (б)

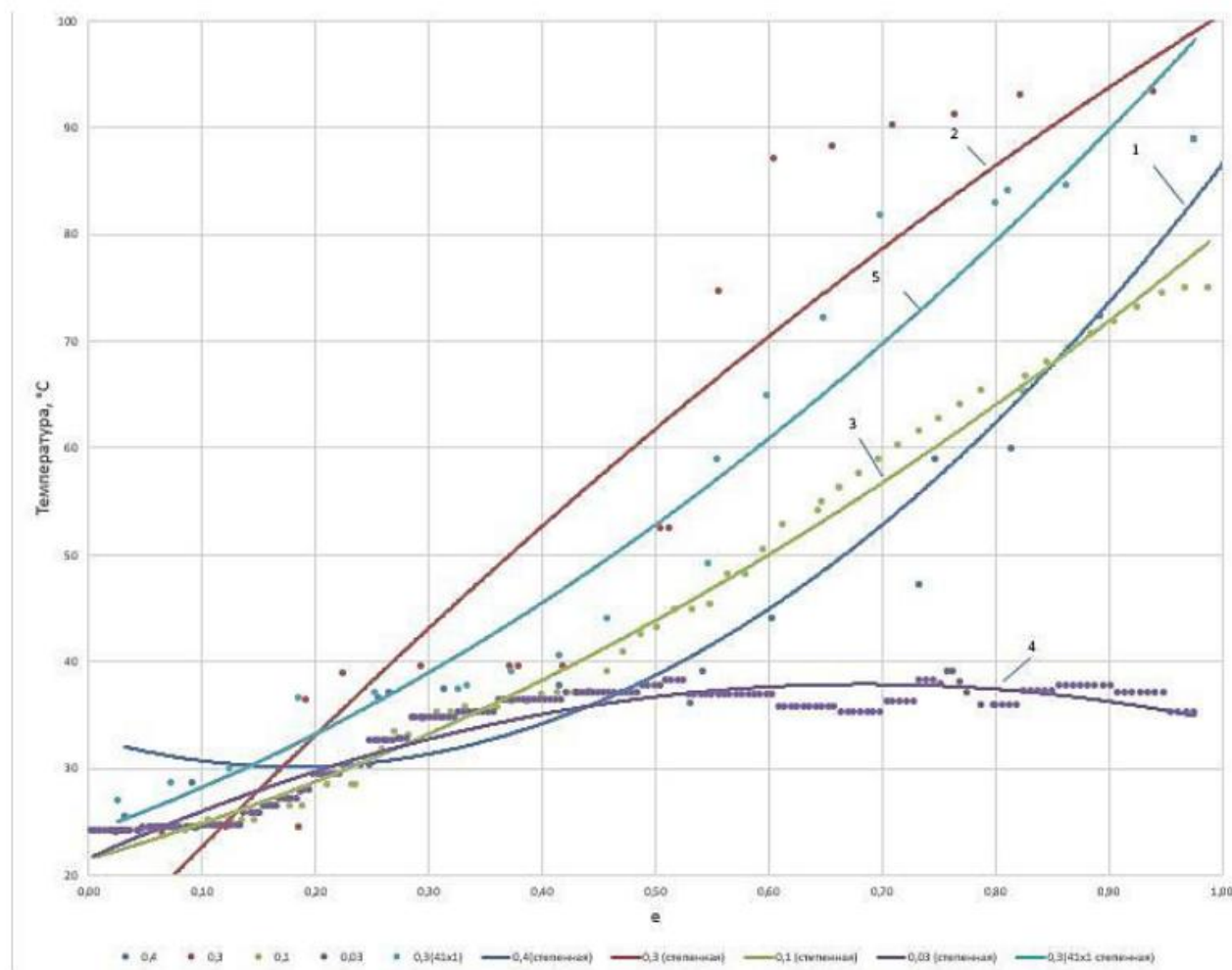


Рис. 3. Зависимости температуры в очаге деформации образцов из сталей 10 и 41X1 от логарифмической степени деформации образцов при осадке:

1 — $\dot{\epsilon}' = 0,4 \text{ с}^{-1}$ (Сталь 10); 2 — $\dot{\epsilon}' = 0,3 \text{ с}^{-1}$ (Сталь 10); 3 — $\dot{\epsilon}' = 0,1 \text{ с}^{-1}$ (Сталь 10); 4 — $\dot{\epsilon}' = 0,03 \text{ с}^{-1}$ (Сталь 10); 5 — $\dot{\epsilon}' = 0,3 \text{ с}^{-1}$ (41X1)

Можно отметить, что при увеличении степени деформации температура в очаге деформации образца увеличивается. Особенно резкий рост температуры наблюдается при степени деформации выше 0,4, что связано с повышенной скоростью накопления пластической деформации и, как следствие, увеличенным выделением тепла.

Сталь 10, несмотря на более высокую теплопроводность, за счет более высокой пластической работы выделяет больше тепла. Сталь 10 (низкоуглеродистая) легче деформируется, выделяя больше тепла, а теплопроводность чуть выше — но все равно тепло остается в зоне деформации (мало времени на отвод).

Сталь 41X1 более легированная, прочная и менее склонна к локальному перегреву при одинаковой нагрузке — теплопроводность немного ниже, но прочностные характеристики позволяют избежать перегрева.

При прочих равных условиях сталь 41X1 аккумулирует меньше тепла в зоне деформации (за счет лучшей прочности и сопротивления деформации).

Тарирование датчика измерения температуры термопарой хромель-алюмель показало незначительные отклонения: при температуре до 100 °C

отклонения от эталонного значения составило 2–3 °С, при значениях температуры от 100 до 200 °С отклонения составили 5–7 °С.

Заключение. В результате обработки экспериментальных данных для разных скоростей деформации (0,03, 0,1, 0,3 и 0,4 с⁻¹) построены зависимости температуры от степени деформации для сталей 10 и 41Х1 в условиях холодной объемной штамповки. Для каждой скорости деформации были подобраны аппроксимирующие модели, позволяющие описать тепловой эффект, возникающий при деформации материала. Полученные зависимости показывают, что с увеличением степени деформации температура заготовки закономерно возрастает, а влияние скорости деформирования выражается в более интенсивном и быстром росте температуры при высоких скоростях деформации. Наибольший тепловой эффект наблюдается при скоростях деформации 0,3 и 0,4 с⁻¹, что связано с увеличением доли теплоты при более интенсивной деформации. Полученные зависимости температуры от степени холодной пластической деформации сталей 10 и 41Х1 в дальнейшем можно использовать для выбора режимов предварительного низкотемпературного нагрева заготовок перед холодной объемной штамповкой сложнопрофильных деталей, обеспечивающего снижение сил деформирования, уменьшение нагрузок на рабочий инструмент и повышение его стойкости.

Список источников

- [1] Сторожев М.В., Попов Е.А. *Теория обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1977, 423 с.
- [2] Tschaetsch H. *Metall Forming practice*. Springer, 2005, 405 p.
- [3] Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Айрапетян А.С., Файрузов Р.С., Кирсанов А.С. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок из легированных сталей на сопротивление деформированию при холодной объемной штамповке. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2021, т. 19, с. 396–399.
- [4] Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Файрузов Р.С., Кирсанов А.С., Габдулхаков И.И. Снижение сил деформирования и нагрузок на инструмент при холодной объемной штамповке сложнопрофильных деталей с использованием предварительного низкотемпературного нагрева заготовок. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2022, т. 20, № 1, с. 22–27.
- [5] Лавриненко В.Ю., Ушаков А.В. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок на механические свойства сталей 41Х1, 20Г2Р и 38ХГНМ. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2025, т. 23, № 1, с. 14–19.