

УДК 620.162.2

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ РЕГУЛИРУЕМОМ НАГРУЖЕНИИ

© А. И. Потапов, Д. А. Двойников, Д. Р. Салихьянов¹*Статья поступила 1 апреля 2014 г.*

Приведены результаты модернизации пластометра кулачкового типа — оснащения его цифровым регулируемым электроприводом и системой сбора и обработки информации на ПЭВМ. Проведенные усовершенствования пластометра позволили повысить точность воспроизведения заданной скорости и снизить механическую нагрузку на кинематические передачи и узлы пластометра. При этом повысилась достоверность получаемых кривых упрочнения испытываемых металлов и сплавов. Предложена новая методика пластометрических испытаний на осадку образцов квадратного поперечного сечения. Сравнительные испытания предложенных и обычных цилиндрических образцов из углеродистых сталей в широком диапазоне степеней и температур деформации показали правомерность использования новой методики и хорошую сходимость результатов, полученных при испытаниях обоих видов образцов в аналогичных условиях. Новая методика позволяет снизить трудоемкость изготовления образцов при наличии заготовок квадратного сечения.

Ключевые слова: сопротивление деформации; пластометр; регулируемый электропривод; методика испытаний; образцы квадратного сечения.

Одна из основных реологических характеристик металлов и сплавов — сопротивление пластической деформации (σ_s), определяемое при осадке образцов на пластометрах, является наиболее информативной, так как позволяет получать данные по сопротивлению деформации в широком диапазоне степеней, скоростей и температур деформации. Расширение диапазонов параметров пластометрических испытаний актуально в связи с разработкой новых материалов и освоением режимов их обработки давлением.

В Институте машиноведения УрО РАН для определения σ_s металлов и сплавов установлен и успешно используется пластометр кулачкового типа с рабочим усилием до 500 кН при осадке холодных или нагретых образцов [1].

Устройство рабочей части пластометра представлено на рис. 1, где 1 — станина; 2 — кулачковый вал; 3 — кулачковая обойма, в которой может быть установлено от одного до четырех кулачков 4; 5 — нажимной ролик; 6 — ползун; 7 — испытуемый образец в контейнере; 8 — ходомер; 9 — месдоза; 10 — клино-

вой регулировочный механизм; 11 — профильный диск; 12 — датчик включения компьютерной записи процесса осадки; 13 — подушка подшипника скольжения кулачкового вала; 14 — возвратные пружины для обратного хода ползуна.

Для повышения точности воспроизведения заданных режимов испытаний и достоверности результатов, а также расширения диапазона параметров испытаний проведена дальнейшая модернизация пластометра. На его базе создан пластометрический комплекс, в состав которого входят также высокотемпературная (до 1400 °С) электропечь, система сбора и обработки информации на базе ПЭВМ с применением датчиков силы (месдозы с тензорезисторами), датчиков величины осадки (ходомера для ползуна), частоты и угла поворота кулачкового вала, командных ключевых датчиков, а также технологическая оснастка и приспособления.

Состав комплекса схематично представлен на рис. 2. Связи между его составляющими обозначены указателями: → — передача энергии; —●— — передача информации; — — → — маршруты оператора при работе.

¹ Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: potapov_ai@list.ru

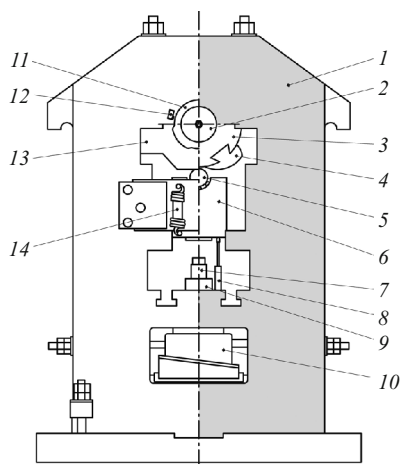


Рис. 1. Схема рабочей части пластометра

При включении двигателя 1 (90 кВт, 1500 об/мин) его крутящий момент передается или через ременную передачу 2 (с передаточным числом $i = 3,23$) или 3 ($i = 1,36$), редуктор 4 и цепную передачу 5 ($i = 2$) на приводной вал с маховиком 6. Обойма 12 с кулачками (до 4 штук через 90°) и, соответственно, кулачковый вал, установленный в подшипниках станины 10, при этом не вращаются. Вращение их возможно лишь после включения управляемой по сцеплению муфты Хилларда 7 электромагнитом 8. Кулачковый вал с обоймой 12 защищен от перегрузок муфтой предельного момента 9. Электродвигатель 1 имеет цифровой комплект электропривода 11 с системой управления.

Комплекс включает систему сбора и обработки информации 15 на базе ПЭВМ с устройствами 16 сопряжения с компьютером. Управление электродвигателем (установка заданной скорости вращения, включение и выключение), а также включение муфты Хилларда для обеспечения рабочего хода ползуна осуществляются с пульта управления 17 посредством ряда датчиков и измерителей 18 (тахометр, ходомер для ползуна, мессдоза и др.). Нагрев образцов до температуры испытания проводится в электрической печи 13 с терморегулятором.

Работа комплекса при участии оператора в цикле испытания образцов состоит в следующем (см. рис. 2). Оператор готовит контейнеры с образцами на стеллаже 14, устанавливает рабочую температуру в печи 13, фиксирует исходные размеры каждого образца и условия опыта (тип смазки и теплоизоляцию, температуру и скорость деформации). Эти данные заносятся в ПЭВМ системы 15. После разогрева печи 13 до температуры испытания оператор помещает в нее контейнер с образцом. Перед началом испытания (осадки) он задает скорость вращения двигателя 1, затем по командам с пульта 17 системы электропривода 1 – 11 – 18 с управлением от системы 15 разгоняет приводной вал с маховиком 6 до заданной скорости вращения. При этом муфта 7 разъединена, вал с кулачковой обоймой 12 неподвижен, кулачок находит-

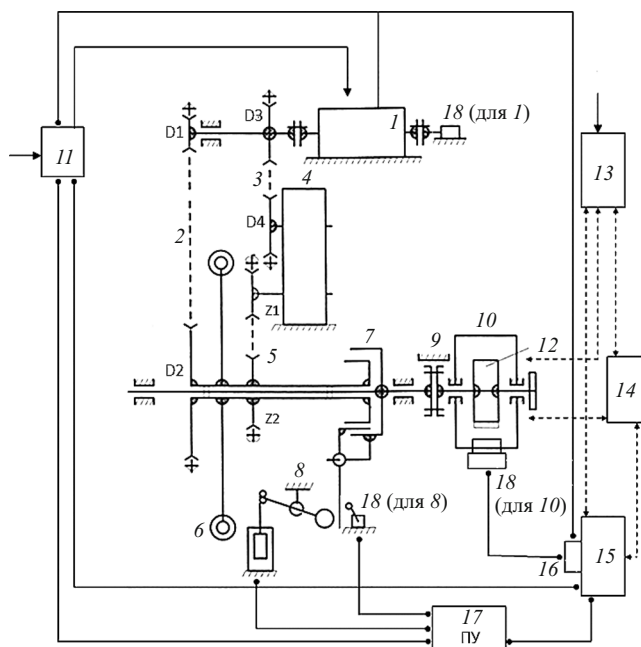


Рис. 2. Кинематическая и функциональная схема пластометрического комплекса

ся в исходной (верхней) позиции. Система 15 – 16 – 18 готова к работе.

Нагретый до температуры испытания контейнер с образцом оператор переносит из печи 13 на мессдозу, установленную на станине 10, и немедленно подает команду с пульта управления 17 на сцепление муфты 7.

Вал с кулачком за цикл осадки поворачивается не более чем на один оборот, что обеспечивается механизмом его сцепления с непрерывно вращающимся валом при помощи указанной выше жесткой роликовой муфты Хилларда. Сцепление и расцепление происходит за $1/78$ оборота вала.

Пластомер связан валом 2 через многоступенчатую переключаемую передачу с мощным двигателем, который оснащен микропроцессорным тиристорным преобразователем Simoreg 6RA70 фирмы Siemens для привода постоянного тока с регулируемой скоростью (с питанием от сети 380/220 В, 50 Гц). Скорость перемещения ползуна v при осадке регулируется скоростью вращения электродвигателя ω .

В экспериментах, как правило, задается постоянная скорость деформации образца $\xi = v/h_m$ в процессе осадки, что обеспечивается фиксированной угловой скоростью вала ω и профилем кулачка [1].

Устойчивость работы пластометра возможна при условии, что станина и детали имеют высокую жесткость, а расположение деталей, с помощью которых реализуется осадка, геометрически точное (см. рис. 1). На практике имеются конструкторские признаки снижения точности работы механизма. Они заключаются в структурной неустойчивости механической системы в зоне деформации образца. Кроме

того, в скользящем подшипнике кулачкового вала имеется рабочий зазор между валом и вкладышами, который заполняется смазкой.

В конструкции пластометрического комплекса важно обеспечивать однонаправленное неколебательное движение механической части в процессе испытания при одновременном сохранении быстрого действия — задании скорости (момента) приводом за минимально возможное время. Для выполнения этих условий предложена нелинейная характеристика блоков управления (регуляторов), реализованных в системе управления и регулирования на базе Simoreg 6RA70. Определено, что характеристики регуляторов полностью определяются совокупностью параметрических и физических ограничений: соотношением маховых масс γ , собственной частотой упругих колебаний механизма пластометра ω_y , а также допустимыми ограничениями по амплитуде тока якоря и его производной [2–4]. В пропорциональном регуляторе скорости, как и в контуре тока (ускорения), предусмотрена стандартная процедура ввода ограничений амплитуд сигналов. Более того, характеристика регулятора скорости разделена по условиям демпфирования колебаний и быстрого действия на линейную и нелинейную области. Для ввода нелинейности предусмотрен свободный функциональный перепрограммируемый блок. Он позволяет задавать форму характеристики блока управления, настраиваемой по 20 заданным точкам. Апробирован ввод обратной связи по производной угловой скорости двигателя для сокращения линейной области управления и обеспечения астатизма системы привода по нагрузке.

При настройке привода параметрирование преобразователя Simoreg 6RA70 и осциллографирование переходных процессов выполнены на персональном компьютере в операционной системе Windows с помощью поставляемой в комплекте программы «Drive Monitor».

Указанная выше оптимизация настроек регуляторов благоприятно сказывается на качестве переходных процессов в приводе комплекса: повышаются быстродействие и точность воспроизведения задания скорости и нагрузки, одновременно снижаются механические нагрузки на валу двигателя и в кинематических передачах установки. Все это приводит к существенному повышению точности результатов испытаний образцов.

Наряду с работой, направленной на повышение точности и достоверности результатов, в лаборатории проводится совершенствование методик пластометрических испытаний.

В практике определения сопротивления деформации металлов и сплавов обычно используются объемные сплошные цилиндрические образцы с отношением исходной высоты h_0 к диаметру d_0 в пределах 1,0 – 1,35. Наиболее часто применяются образцы диаметром $d_0 = 12 \div 15$ мм. Методика испытаний осадкой таких образцов на рассматриваемом пластометре подробно описана в работе [1]. Для оценки сопротивления деформации листовых материалов нами предложен и используется метод осадки цилиндрических образцов, составленных из шайб, вырубаемых в специальном штампе из листов исследуемого материала. В работе [5] доказаны правомерность использования составных образцов и хорошая сходимость результатов определения σ_s на обычных сплошных и составных образцах.

В данной работе предлагается новая методика определения сопротивления деформации на пластометрическом комплексе с применением образцов квадратного поперечного сечения. Необходимость использования таких образцов может возникнуть в исследовательской практике при наличии проката или кованых прутков квадратного сечения из исследуемой стали. При этом отпадает необходимость изготовления из них цилиндрических образцов на токарных станках. В этом случае образцы готовятся лишь резкой прутков на соответствующие длины.

Для установления правомерности использования предлагаемой методики из проката углеродистых сталей сечениями $9,8 \times 9,8$ мм (сталь 10) и 10×10 мм (сталь 20) были изготовлены образцы указанных квадратных сечений высотой $15 \pm 0,2$ мм. Другая часть образцов была переточена на токарном станке на образцы диаметрами 9,3 и 9,4 мм соответственно. Химический состав исследованных сталей представлен в таблице.

Образцы обоих видов нагревали в печи одновременно (в одной садке), после чего подвергали осадке на пластометре для определения сопротивления деформации в одинаковых условиях: при температурах холодной (20 и 300 °С), теплой (500 и 700 °С) и горячей (900 и 1100 °С) деформации и $\xi = 1,0 \text{ с}^{-1}$. При осадке применяли одинаковую смазку. Степень осадки $e = \ln h_0/h_k$ находилась в пределах 0,7 – 0,8 (h_0 и h_k — начальная и конечная высоты образца при осадке).

Примеры компьютерной записи процесса осадки образцов круглого (*a*) и квадратного (*б*) сечений из стали 20 при температуре 500 °С приведены на рис. 3. Здесь 1 — график перемещения ползуна с бойком (шкала справа); 2 — график изменения силы осадки образца (шкала слева); 3 — шкала временных точек отсчета.

Анализ кривых свидетельствует о полной идентичности записи данных для тех и других образцов. Кривые 2 (см. рис. 3) различаются лишь величиной U и, следовательно, величиной силы осадки.

Химический состав исследованных сталей (% масс.)

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
10	0,11	0,16	0,49	0,18	0,12	0,004	0,048
20	0,23	0,26	0,62	0,13	0,09	0,026	0,018

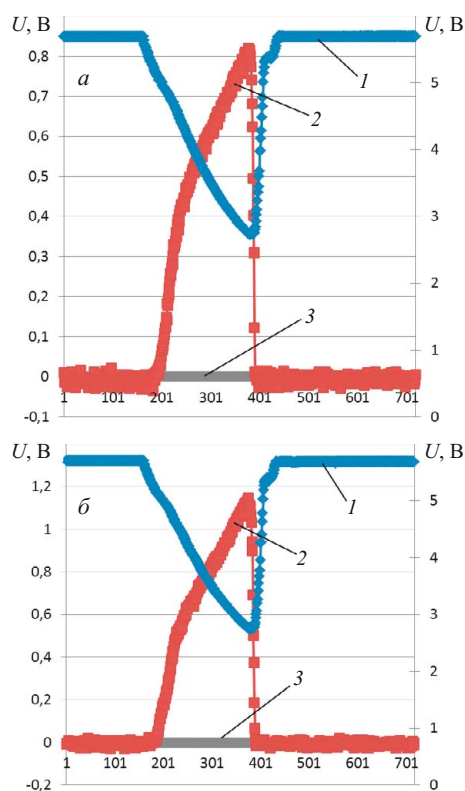


Рис. 3. Примеры компьютерной записи процесса осадки образцов круглого (а) и квадратного (б) поперечных сечений из стали 20 при 500 °С

При применении эффективных смазок осадка тех и других образцов происходит довольно равномерно, без заметного бочкообразования, а квадратное поперечное сечение образца остается таковым и после деформации (рис. 4). Это позволяет считать, что схема напряженного состояния металла при осадке образцов близка к линейной. Следовательно, величину напряжения течения (сопротивления деформации) можно определить с минимальной ошибкой как $\sigma_s = P/F_m$, где P — сила осадки (определяется мессдозой), F_m — текущая площадь поперечного сечения образца, изменяющаяся по мере осадки. Значение F_m рассчитывается из условия постоянства объема по формулам: $F_m = 0,25\pi d_0^2 h_0 / h_m$ — для цилиндрических образцов; $F_m = A_0 d_0^2 h_0 / h_m$ — для образцов квадратного сечения, где d_0 и h_0 — исходные диаметр и высота образца; A_0 — исходная сторона квадрата; h_m — текущая высота образца. Последняя определяется исходя из начальной высоты образца с использованием шкалы временных точек отсчета на диаграммах компьютерной записи. Для каждой такой точки рассчитывается напряжение течения — сопротивление деформации σ_s .

Поскольку сила P , определяемая мессдозой, записывается в вольтах (В) (см. рис. 3), для пересчета в кгс используются результаты ее тарировки, по которой определяется коэффициент k в формуле $P = kU$.

Результаты экспериментов — кривые упрочнения исследованных сталей — представлены на рис. 5.

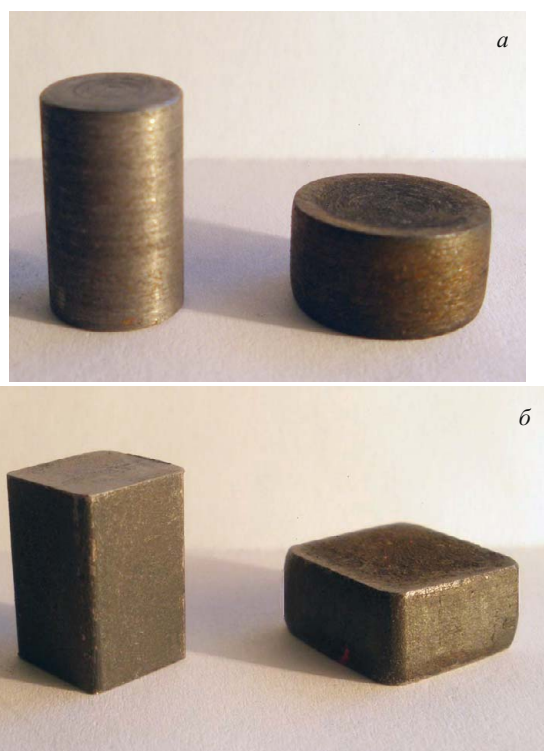


Рис. 4. Вид цилиндрических образцов (а) и образцов квадратного сечения (б) до и после осадки на пластометре

Видно, что кривые упрочнения, полученные при осадке образцов обоих видов сечений, практически совпадают, что указывает на правомерность использования для пластометрических испытаний не только традиционно применяемых цилиндрических образцов, но и образцов квадратного сечения.

При проведении экспериментов особое внимание следует обратить на подбор эффективных смазок, что необходимо для обеспечения равномерной деформации, особенно образцов квадратного сечения, на торцах которых не могут быть выполнены выточки для предотвращения выдавливания смазки в процессе осадки.

Отметим, что полученные кривые упрочнения (кривые течения) исследуемых сталей хорошо согласуются с литературными данными. Так, максимальный уровень сопротивления деформации имеет место в зоне синеломкости (при температуре 300 °С). В условиях теплой деформации (500 – 700 °С) по достижении величины $\epsilon \approx 0,5$ начинаются процессы динамического разупрочнения, приводящие к некоторому снижению сопротивления деформации σ_s .

Таким образом, проведенная модернизация пластометра на основе разработанной методики оптимизации настроек электрических параметров электропривода, обеспечивающих быстроедействие и демпфирование упругих колебаний, позволила повысить точность воспроизведения заданной скорости и нагрузки. Последнее в совокупности с системой сбора и обра-

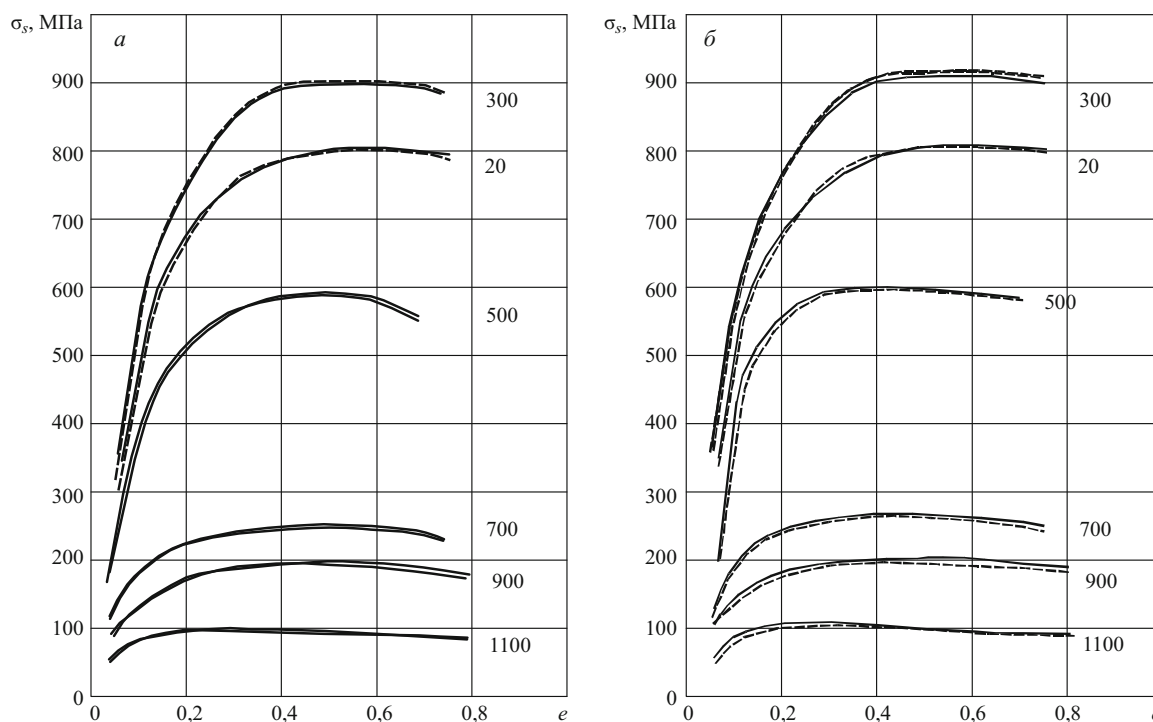


Рис. 5. Кривые упрочнения стали 10 (а) и стали 20 (б), полученные при осадке образцов круглого (сплошные линии) и квадратного (штриховые линии) сечений при температурах 20 – 1100 °С (цифры у кривых)

ботки информации на ПЭВМ повысило достоверность результатов испытаний.

Экспериментально подтверждена правомерность использования методики, включающей осадку образцов квадратного поперечного сечения, для определения сопротивления деформации металлов и сплавов в широком диапазоне температур и степеней деформации в условиях применения эффективных смазок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов А. И., Мазунин В. П., Двойников Д. А., Коковихин Е. А. Методика исследований сопротивления деформации на пластометрическом комплексе / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 9. С. 59 – 63.
2. Мазунин В. П., Двойников Д. А. Параметрические ограничения в нелинейных системах управления механизмами с упругостью / Электротехника. 2010. № 5. С. 9 – 13.
3. Мазунин В. П., Двойников Д. А. Повышение быстродействия при управлении регулируемыми электроприводами механизмов с упругими связями / Электротехника. 2012. № 10. С. 35 – 41.
4. Мазунин В. П., Двойников Д. А. Особенности анализа переходных процессов в оптимизированных по быстродействию нелинейных системах управления электроприводами / Электротехника. 2006. № 7. С. 2 – 7.
5. Потапов А. И., Гладковский С. В., Коковихин Е. А., Мазунин В. П. Определение сопротивления деформации листовых материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Том 77. № 6. С. 52 – 56.