

должительности нагрузочной фазы удара (в 2,5 раза), приводящее к снижению сил деформирования (в 1,35 раза) и увеличению работы пластической деформации и КПД удара (в 1,12 раза) по сравнению с осадкой стандартной бабой;

2) полученные данные с достаточной точностью подтверждают экспериментальные данные по осадке свинцовых заготовок стандартной бабой и бабой с наполнителем.

3) полученные данные можно использовать в технологических целях при ковке на молотах заготовок из углеродистых и низколегированных сталей.

#### Литература

1. Феофанова А.Е., Лавриненко В.Ю. Экспериментальные исследования процесса удара при осадке цилиндрических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. - № 2. – С. 12-15.

2. Лавриненко В.Ю. Определение энергосиловых параметров процесса ударного деформирования при осадке цилиндрических заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2012. - №7. – С.24-28.

### Разработка оснастки для нахождения предела текучести материалов термографическим методом

Косачев Н.В., доц. к.т.н. Петров П.А., Прокопов Ф.Б., Воронков В.И.

Университет машиностроения

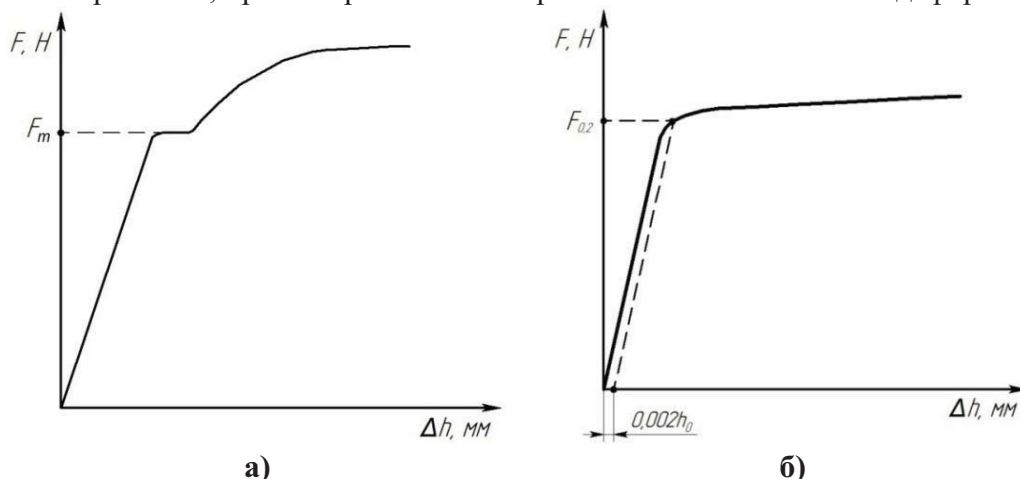
8(495)223-05-23 доб. 1306, 1243, 1045, [dayvey@mail.ru](mailto:dayvey@mail.ru)

*Аннотация.* В статье рассмотрена реализация термографического метода определения предела текучести методом сжатия объёмных образцов с применением специализированной оснастки.

*Ключевые слова:* предел текучести, термографический метод, физический предел текучести, оснастка для проведения испытаний на сжатие

#### Введение

Предел текучести является основополагающей характеристикой материала при расчёте конструкций на прочность и расчётах процессов штамповки [9-13]. Пределом текучести называется напряжение, при котором начинает развиваться пластическая деформация.



**Рисунок 1. Определение силы соответствующей пределу текучести: а – материалы с ярко выраженной площадкой текучести; б – материалы без ярко выраженной площадки текучести**

Различают физический и условный предел текучести. В соответствии с ГОСТ 25.503-97 (ГОСТ на проведение механических испытаний методом сжатия) сила, соответствующая физическому пределу текучести, определяется по площадке текучести на диаграмме силы (рисунок 1а), а далее по найденной силе рассчитывается физический предел текучести. По значению  $F_m$  определяется значение напряжения текучести по формуле (1):

$$\sigma_{\delta} = \frac{F_{\delta}}{A_0}, \quad (1)$$

где  $A_0$  – начальная площадь поперечного сечения цилиндрического образца;  $F_T$  – сила, соответствующая площадке текучести.

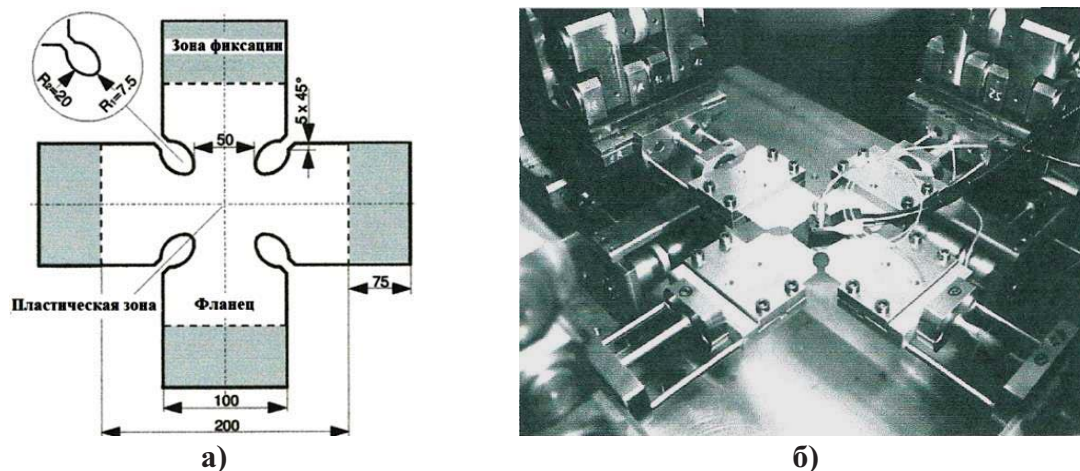
Однако не у всех материалов диаграмма силы имеет ярко выраженную площадку текучести (в частности, у алюминиевых сплавов). Для таких материалов определяется условный предел текучести (рисунок 1б).

Определение условного предела текучести даёт лишь приблизительное значение напряжения, при котором начинается пластическая деформация материала. Отсутствие возможности определения предела текучести (силы соответствующей пределу текучести) непосредственно из диаграммы силы при исследовании материалов без ярко выраженной площадки текучести приводит к необходимости разработки других методик определения предела текучести.

### Теоретическая часть

Переход упругих деформаций в пластические сопровождается различными физическими явлениями: наличием остаточных деформаций, тепловым излучением, акустической эмиссией, изменением работы выхода электрона и т.д. Зная характер изменения указанных физических явлений (при переходе тела в пластическое состояние), необходимо сопоставить их с изменением силы при деформации исследуемого образца и таким образом определить силу соответствующую пределу текучести.

В теории обработки металлов давлением (ТОМД) изменение температуры металла при упругих деформациях, а также при переходе материала в пластическое состояние не рассматривается. Это связано с тем, что на процесс формоизменения металла при пластическом деформировании указанное изменение температуры не оказывает влияния. Несмотря на это, эффект понижения температуры металла при упругих деформациях и повышения температуры при переходе металла в пластическое состояние имеет практическую ценность, т.к. с его помощью можно определять физический предел текучести материалов, у которых нет ярко выраженной площадки текучести.



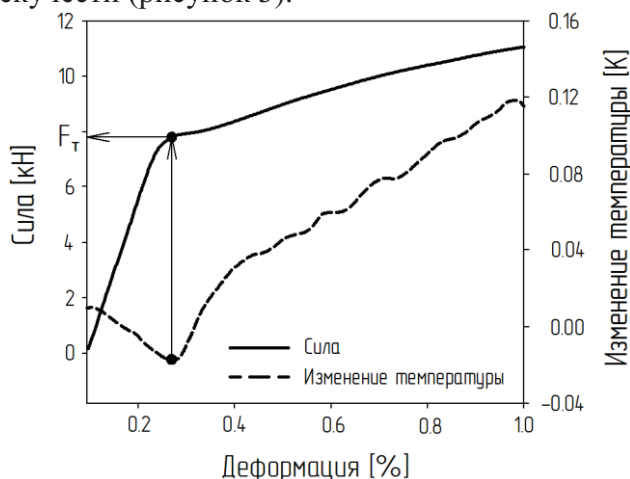
**Рисунок 2. Испытание на двухосное нагружение (а – крестообразные образцы для испытания на двухосное растяжение; б – ЧПУ станок для испытания на растяжение крестообразных образцов)**

Способ определения предела текучести на основе изменения его температуры в процессе деформирования известен давно, впервые его использовал Габричевски [1] для определения текучести при одноосном испытании на растяжение. Данный метод был также опробован при испытании на двухосное растяжение Саллатом [2], доработкой метода впоследствии занимались Мюллер [3], Пёланд [4], Банабик и др. [5 – 6].

Банабик обосновал метод теоретически и провел серию испытаний методом двухосного

растяжения листовых (толщиной 1,0 мм) крестообразных образцов из алюминиевого сплава AA5182-0 (рисунок 2а) с использованием ЧПУ станка (рисунок 2б) [6].

Термографический же метод основан на сопоставлении диаграммы силы с графиком изменения температуры образца. При упругом деформировании температура тела, в соответствии с эффектом Джоуля-Томпсона, понижается, а при пластическом деформировании температура тела повышается. Таким образом, существует точка минимума температуры, которая будет соответствовать началу пластических деформаций. Сопоставив графики изменения температуры и силы по точке минимума температуры, определяем силу, соответствующую физическому пределу текучести (рисунок 3).



**Рисунок 3. Сопоставление графика силы и графика изменения температуры образца при термографическом методе**

Результаты проведенных экспериментов, которые описывают Банабик и Гютинк [6], говорят о том, что принципиально термографический метод позволяет с большой точностью определять предел текучести материалов. Однако авторы статьи [6] столкнулись с проблемой подбора скорости деформирования образца, т.к. при слишком больших скоростях деформирования неизбежно возникают сложности с измерением и последующим сопоставлением температуры и силы деформации, а при малых скоростях существенное влияние оказывает теплообмен образца с окружающей средой, что приводит к неточностям в экспериментальных данных. Кроме этого, теоретические расчёты температуры не совпадают с реально наблюдаемыми результатами. Это говорит о том, что при теоретическом расчёте были учтены не все факторы, влияющие на изменение температуры.

Таким образом, при проектировании для определения предела текучести термографическим методом необходимо решить следующие задачи:

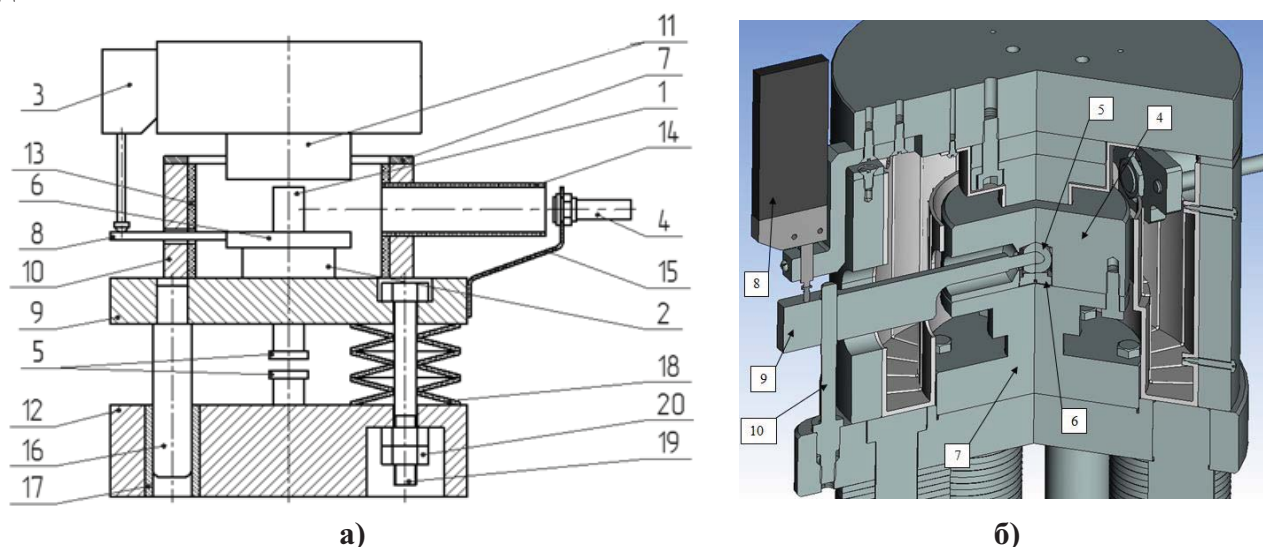
- 1) обеспечить точность измерения температуры образца и построение диаграммы силы при больших скоростях деформации;
- 2) максимально исключить влияние внешних факторов на точность измерений.

#### **Конструкторская часть**

Для определения предела текучести на основе термографического метода была разработана оснастка для проведения испытаний методом сжатия цилиндрических образцов (рисунок 4). Прототипом для создания послужило устройство, рассмотренное в патенте РФ 120773 [7]. Оснастка состоит из датчика силы 2, контактного датчика перемещения 3, бесконтактного инфракрасного датчика температуры 4, концевого выключателя 5, стола 6, сменного ограничителя закрытой высоты 7, балки 8, которая закреплена на столе 6, верхней плиты 9, опоры 10, сменного бойка 11, нижней плиты 12, пластикового кожуха 13, пластиковой трубы 14, держателя инфракрасного датчика температуры 15, колонок 16, втулок 17, пакетов тарельчатых пружин 18, болтов 19 и гаек 20.

При осадке образца существенно упрощается расчёт деформаций, упрощается способ замера изменения геометрии образца, что позволяет исключить дополнительные погрешности, вызванные неточностью расчётов и измерений. Осадка образца – существенно более

простая схема деформирования, чем двухосное растяжение, и её можно реализовать практически на любой испытательной машине. Измерение температуры производится инфракрасным бесконтактным датчиком. Устранение влияния внешних факторов на измерение температуры достигается тем, что рабочее пространство оснастки закрыто пластиковым кожухом 13, а датчик температуры помещён в пластиковую трубу 14. Таким образом, за счёт того, что излучаемые длины волн в инфракрасном диапазоне у пластика и металла существенно отличаются, закрытие всех металлических элементов в рабочей зоне оснастки пластиком позволит минимизировать возможные помехи. Также применение пластикового кожуха и трубы позволит максимально изолировать рабочую зону оснастки от воздействия окружающей среды.



**Рисунок 4. Схема оснастки для испытаний на сжатие при комнатной температуре (а – чертеж инструмента; б – трехмерная модель оснастки в разрезе)**

Разработанная оснастка помимо определения физического предела текучести позволяет строить кривые упрочнения материалов при комнатной температуре, тем самым расширяет её функциональные возможности. На оснастке возможна осадка образцов с различной начальной высотой и с различной степенью деформации. Для этого предусмотрен сменный ограничитель закрытой высоты и сменный боёк. Методика обработки результатов исследований, связанных с построением кривой упрочнения, представлены в работе [8].

Для достижения необходимой точности при осадке образцов до заданных конечных деформаций в данной оснастке применен буфер, который начинает сжиматься после того, как верхний боёк 11 упрётся в ограничитель закрытой высоты 7. Буфер состоит из нескольких пакетов тарельчатых пружин 18, горизонтальное перемещение которых ограничивают болты 19 и гайки 20 колонок 16 и втулок 17. Тарельчатые пружины 18 предварительно стянуты до расчётной нагрузки, что гарантирует неподвижность верхней плиты 9 до того момента, пока образец не будет осажен до заданной величины.

#### **Выводы**

При определении предела текучести термографическим методом важно максимально точно определить диаграмму силы и график изменения температуры образца на начальной стадии деформации. В разработанной оснастке точность построения диаграммы силы обеспечивается простотой схемы испытания и способом крепления датчика перемещения. Точность измерения температуры образца обеспечивается изоляцией рабочего пространства оснастки, как от внешних воздействий, так и от воздействия самой оснастки на точность работы датчика температуры.

Таким образом, реализация термографического метода определения физического предела текучести материалов на специализированной оснастке может позволить с высокой точностью определить напряжение, соответствующее переходу металла в пластическое состояние.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ГК № 14.В37.21.0874.

### Литература

1. Z. Gabryszewski, W. Srodka, Zastosowarietemperatursprzezonej z odkształceniami do oceny dysypacji energii i wyznaczania granie plastycznosci, *Mechanica Teoretyczna i Stosowana*, 19, 1981
2. G. Sallat, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Fließverhalten von Blechen im zweiachsigen Hauptspannungszustand, Dissertation, TU Karl-Marx-Stadt, 1988
3. W. Müller, Beitrag zur Charakterisierung von Blechwerkstoffen unter zweiachsiger Beanspruchung, Dissertation, Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin
4. W. Müller и К. Pöhlandt, New experiments for determining yield loci of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, 60, 1996, pp. 643 – 648.
5. D. Banabic, D.S. Comsa, S. Keller, S. Wagner, K. Siegert, An yield criterion for orthotropic sheet metals, *Innovations in processing and manufacturing of sheet materials*, ed. M. Demeri, TMS, Warrendale, 2001, pp. 145 – 159.
6. D. Banabic, J. Huetink. Determination of the yield locus by means of temperature measurement, *Proceedings of the International Conference on material forming ESAFORM*, 2006, pp.
7. П.А. Петров, Ф.Б. Прокопов, М.А. Петров, В.И. Воронков, Устройство для исследования сопротивления металлов и сплавов горячей деформации, Патент 120773 РФ, МПК G01N 3/28, опубликовано 27.09.2012.
8. P. Petrov, V. Voronkov, K. Potapenko, M. Petrov, O. Gamzina, Research into the flow stress of Al-Mg-Si alloy (AD-35) during the abrupt change of the strain rate at elevated temperatures, *Key Engineering Materials*, Vol. 554 – 557, 2013, pp. 1099 – 1104.
9. Петров П.А., Воронков В.И., Петров М.А., Назарова О.А., Шай хулов М.В. Анализ методов исследования контактного трения, основанных на выдавливании деформируемого материала / *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2011, № 1. С. 177-184.
10. Петров П.А., Гневашев Д.А., Воронков В.И., Иванов В.А., Басюк С.Т. Конечно-элементное моделирование процесса изготовления тонкостенных оболочек в штампе с жестким буферным устройством / *Технология легких сплавов*. 2011. № 1. С. 86-93.
11. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю. Листовой демпфирующий материал для кузовных деталей. Свойства при сдвиговой деформации / *Автомобильная промышленность*. 2010. № 10. С. 39.
12. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Исследование свойств многослойных листовых материалов / *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. № 1. С. 28-31.
13. Соболев Я.А., Аверкиев А.Ю., Шпунькин Н.Ф., Феофанова А.Е. Ковка и штамповка / *справочник в 4-х томах / Москва*, 2010

### **Пружинение многослойного материала**

к.т.н. доц. Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю.  
*Университет машиностроения*  
(495) 223-05-23 доб. 1113, [ti@mami.ru](mailto:ti@mami.ru)

*Аннотация.* Проведено экспериментальное исследование пружинения многослойного материала. Выполнено сравнение пружинения однослойного и многослойного образца. Выявлены характер изменения пружинения в зависимости от угла изгиба и внутреннего радиуса.

*Ключевые слова:* пружинение, многослойный материал, угол изгиба, относительный радиус изгиба

Пружинение листовых деталей называется упругое изменение размеров после снятия нагрузки. Наличие пружинения влияет не только на качество деталей, но и требует значительного изменения геометрии деформирующего инструмента [1,3-8]