

Факторы, влияющие на точность осадки при штамповке на гидравлическом прессе

12, декабрь 2012

DOI: 10.7463/1212.0500313

Вяткин А. Г., Вяткин А. А.

УДК .621.77.3

Россия, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

m1@bmstu-kaluga.ru

Холодная осадка плоскопараллельными плитами цилиндрических заготовок является типовой операцией холодной объемной штамповки (ХОШ). Она может быть как завершающей, самостоятельной операцией, так и подготовительным переходом при выполнении различных операций ХОШ. Условно, плоскую осадку разделяют на калибровку и собственно осадку. Такое разделение производят в зависимости от величины относительного уменьшения высоты исходных заготовок, которое оценивают степенью деформации - $\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}$, где h_0 – высота

исходной заготовки, h – высота деформированной поковки. При калибровке величина степени деформации обычно принимается $\varepsilon \leq 0,1 \dots 0,15$, а при собственно осадке – $\varepsilon \geq 0,1 \dots 0,15$.

Вопросы точности осадки изучены недостаточно, особенно применительно к осадке на гидравлических прессах. В работах [1, 2] рассмотрены специфические особенности холодной калибровки поковок на кривошипных прессах после горячей штамповки, где анализировалось лишь влияние погрешностей высотных размеров поковок и жесткости системы кривошипный пресс-штамп на точность калибровки.

В отличие от кривошипных у гидравлических прессов отсутствует кинематически обусловленное постоянство хода ползуна. Если процесс штамповки осуществляется на гидравлическом прессе с упором в поковку при постоянной величине силы, тогда постоянный ход ползуна может быть обеспечен лишь при отсутствии погрешностей технологического процесса. Если технологический процесс штамповки сопровождается погрешностями, тогда ход ползуна гидравлического пресса не является стабильным. Его крайнее нижнее положение определяется лишь моментом равенства силы, создаваемой постоянным по величине давлением жидкости на плунжер пресса, и силы сопротивления поковки деформированию. Сила сопротивления поковки изменяется под влиянием погрешностей технологического

процесса и вызывает отклонение высоты поковок. В таком режиме работы пресса погрешности высоты поковок не зависят от жесткости гидравлического пресса.

Одним из основных критериев точности плоской осадки является погрешность высоты поковки (Δh).

В общем случае на погрешность высоты поковки оказывает влияние ряд факторов, которые условно можно разделить на три группы:

1) факторы, характеризующие исходную заготовку: – погрешности ее высоты и диаметра (Δh_3 и Δd_3), возможные колебания напряжения текучести материала заготовки ($\Delta \sigma_s$), а также параметры заготовки, влияющие на величину коэффициента трения ($\Delta \mu$);

2) факторы, отражающие силовой режим процесса деформирования поковки: – степень деформации исходной заготовки по высоте ($\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$) и отношение диаметра поковки к ее высоте (d/h);

3) факторы, характеризующие оборудование: – коэффициент жесткости системы пресс штамп (C) и скорость деформирования, которая может оказывать влияние на величину напряжения текучести σ_s .

Факторы первой группы имеют случайный неконтролируемый характер, факторы второй и третьей группы – контролируемые.

Неотъемлемой особенностью всех операций ХОШ является то, что процесс деформирования заготовок сопровождается упрочнением их материала. С увеличением степени деформации (ε) возрастает напряжение текучести материала (σ_s). Связь между этими двумя параметрами отражается в кривых упрочнения, показывающих зависимость напряжения текучести материала заготовки от степени ее деформации $\sigma_s = f(\varepsilon)$. Необходимо отметить, что в зависимости от принятого показателя степени деформации различают кривые упрочнения первого и второго рода. При построении кривых упрочнения по данным испытания на осадку деформацией первого рода является относительное увеличение площади образца $\psi = \frac{F - F_0}{F_0}$,

а второго рода относительное уменьшение высоты образца (ε). На рис. 1 представлена кривая упрочнения второго рода для отожденного сплава АД1, построенная по результатам осадки цилиндрических заготовок с торцевыми выточками, заполненными стеарином. Характер кривой отражает универсальный характер влияния степени деформации на предел текучести и показывает, что при малых степенях деформации интенсивность упрочнения ($D\sigma_s/D\varepsilon$) более высокая, с ростом деформации, после достижения условного порога упрочнения, она значительно уменьшается.

При холодной осадке любые отклонения размеров исходной заготовки приводят не только к изменению ее объема, но и степени деформации ($\Delta\varepsilon$) и, как следствие, к изменению величины напряжения текучести материала ($\Delta\sigma_s$). Таким образом, можно сделать заключение о сложной взаимосвязи факторов, влияющих на точность плоской осадки.

В технологии объемной штамповки погрешности размеров исходных заготовок принято характеризовать комплексным показателем – величиной относительной погрешности их объема ($\delta V = \frac{\Delta V}{V}$). При осадке погрешности высоты и диаметра исходной заготовки

неоднозначно влияют на степень ее деформации по высоте, упрочнение материала и, как следствие, на погрешность высоты поковки. Поэтому целесообразно отдельно оценивать влияние указанных погрешностей на относительную погрешность высоты поковки ($\delta h = \frac{\Delta h}{h}$).

Для чего относительную погрешность объема, вызванную отклонением высоты заготовки, обозначим как δV_h , а отклонением диаметра δV_d .

Для оценки характера влияния перечисленных факторов на точность осадки выполнен комплекс однофакторных и многофакторных экспериментов.

На первом этапе при проведении однофакторных экспериментов исследовалось различное влияние погрешностей высоты и диаметра исходной заготовки на относительную погрешность высоты поковки.

На гидравлическом прессе модели П6320 с номинальной силой $P=100$ кН осуществляли осадку цилиндрических заготовок из отожженного сплава АД1 ($HB \approx 190$ МПа). Отношение размеров поволоков d/h принимали 3,0 ($\emptyset 30 \times 10$). Номинальная степень деформации ε (при $\Delta V=0$) исходных заготовок по высоте была равной 0,1 и 0,36.

Силу деформирования ($P_{\text{деф}}$) устанавливали для номинальной исходной заготовки, у которой погрешность объема была равна нулю. Постоянство $P_{\text{деф}}$ обеспечивалось соответствующей настройкой предохранительного клапана в гидросистеме прессы. Контроль усилия осуществляли по манометру.

Вносились относительные объемные погрешности исходных заготовок δV_h и δV_d , которые задавались на уровнях 5 % и 10 %.

Зависимость напряжения текучести сплава АД1 от степени деформации определяли по экспериментальной кривой упрочнения (рис. 1).

Исходили из того, что отклонения высоты и диаметра исходной заготовки по разному влияют на изменение степени деформации ($\Delta\varepsilon$) и следовательно на изменение напряжения текучести материала поковки ($\Delta\sigma_s$). Так положительное отклонение высоты исходной заготовки ведет к увеличению степени деформации по высоте, а положительное отклонение диаметра к

увеличению площади контакта поковки со штампом и, как следствие, к уменьшению степени деформации. Причем, необходимо отметить, что интенсивность упрочнения ($D\sigma_s/D\varepsilon$) существенно различна, в зависимости от того, с какой степенью деформации производится осадка, до или после условного порога упрочнения.

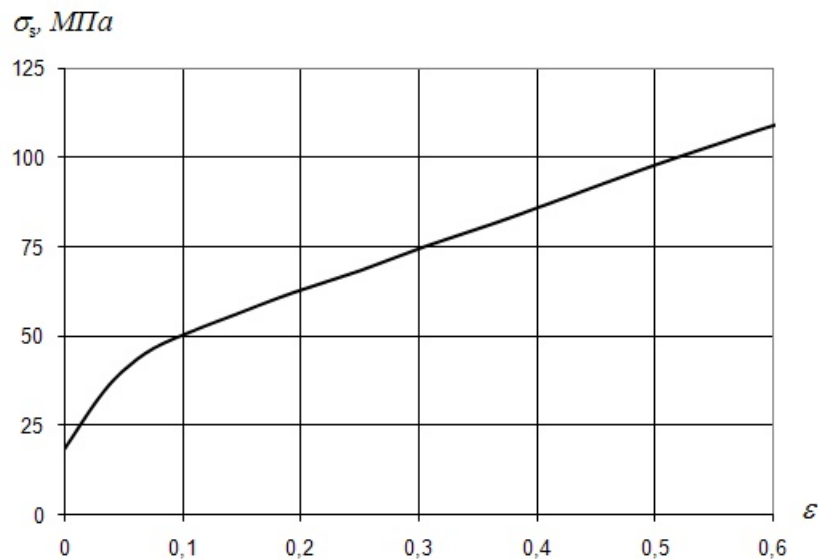


Рис. 1. Кривая упрочнения для отожженного сплава АД1 ($HB \approx 190$ МПа)

По результатам экспериментов построены графики, показывающие зависимость относительной погрешности высоты поковки (δh) от относительных объемных погрешностей исходной заготовки δV_h и δV_d . На рис. 2 представлен график для степени деформации исходной заготовки $\varepsilon = 0,1$, а для степени деформации $\varepsilon = 0,36$ - на рис. 3.

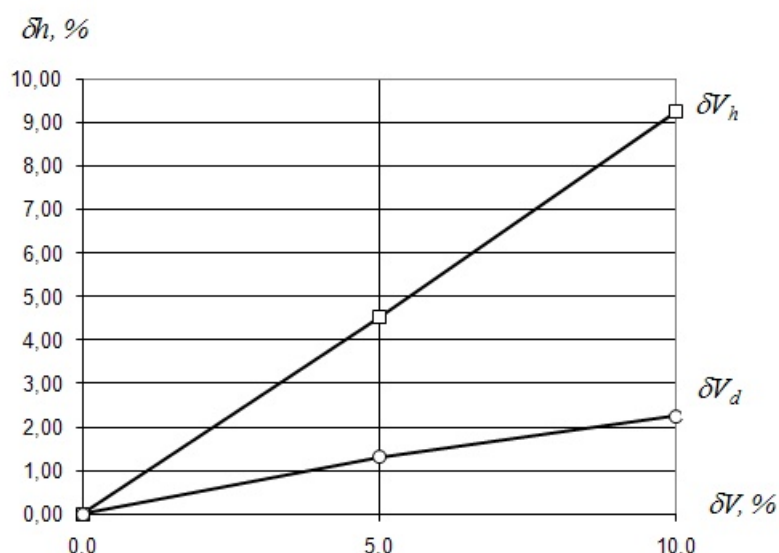


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности высоты поковки от погрешностей высоты и диаметра исходной заготовки ($\varepsilon = 0,1$, $d/h = 3,0$)

Из графиков, представленных на рис. 2 видно, что влияние δV_h и δV_d на относительную погрешность высоты δh для $\varepsilon = 0,1$ значительно отличается.

Объяснение этому следует из анализа формулы для определения силы деформирования при осадке цилиндрических заготовок [3]:

$$P = \sigma_s \cdot F \left(1 + \mu \frac{d}{3h} \right), \quad (1)$$

где σ_s – напряжение текучести материала поковки, $F = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь контакта поковки со штампом, μ – коэффициент трения, d и h – размеры поковки после осадки.

Исходя из (1) и особенностей режима работы гидравлического пресса ($P = \text{const}$), очевидно, что отклонение высоты исходной заготовки не вызывает изменения σ_s ($\Delta\sigma_s = 0$), а значит относительная погрешность высоты поковки (δh) зависит только от относительной погрешности объема исходной заготовки, вызванной отклонением высоты (δV_h) при $\delta V_d = 0$. Таким образом вся объемная погрешность δV_h переходит в погрешность высоты поковки. В частности, при осадке заготовок с заданными относительными объемными погрешностями δV_h равными 5 % и 10 % относительная погрешность высоты поковки δh равна 5 % и 10 % соответственно. Следует заметить, что это справедливо для любой степени деформации (см. рис. 2 и 3), т.е. $\Delta\varepsilon$ и $\Delta\sigma_s$ равны нулю.

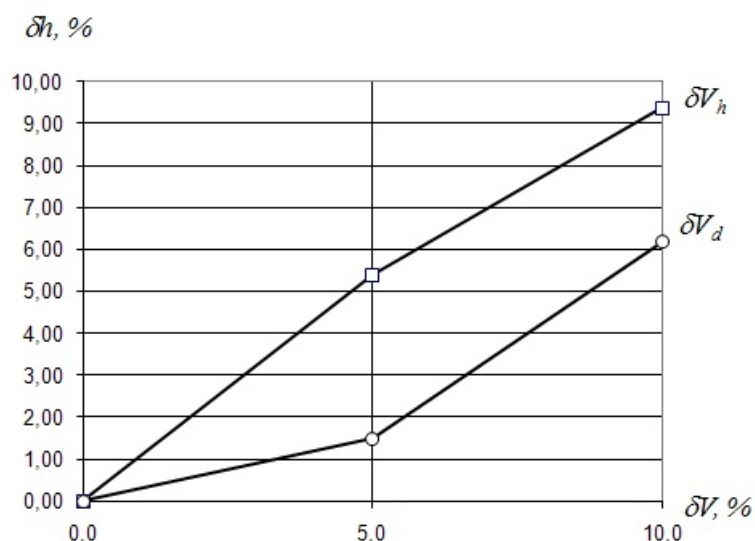


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности высоты поковки от погрешности высоты и диаметра исходной заготовки ($\epsilon = 0,36, d/h = 3,0$)

Рассматривая зависимость δh от δV_d , необходимо отметить, что погрешность диаметра исходной заготовки вызывает изменение площади контакта поковки со штампом и, следовательно, при $P = \text{const}$ соответствующее пропорциональное изменение напряжения текучести материала ($\Delta\sigma_s$). Если отклонение диаметра положительно, то при неизменной силе осадки происходит уменьшение степени деформации поковки по сравнению с исходной (ϵ_0), и, как следствие, уменьшение σ_s .

Так при осадке со степенью деформации $\epsilon = 0,1$ внесение положительной погрешности δV_d равной 5 % вызывает уменьшение степени деформации на 0,012 и соответствующее уменьшение σ_s на 4,2 % ($\Delta\sigma_s = 3$ МПа). При $\delta V_d = 10$ % степень деформации уменьшается на 0,026, σ_s – на 7 % ($\Delta\sigma_s = 5$ МПа).

Необходимо также отметить, что влияние δV_d на δh зависит от степени деформации (ϵ) исходной заготовки по высоте (см. рис. 3 и 4). Так при $\delta V_d = 10$ % для $\epsilon = 0,1$ и $\epsilon = 0,36$ значения δh равны 2,8 % и 6,5 % соответственно. Это объясняется тем, что с увеличением степени деформации ее относительное изменение $\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}$ при одной и той же абсолютной величине $\Delta\epsilon$ становится меньше и интенсивность упрочнения ($D\sigma_s/D\epsilon$) значительно снижается.

В частности, при $\delta V_d = 10$ % для степени деформации $\epsilon = 0,1$ величина убывания $\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}$ равна

0,26, для $\epsilon = 0,36 - \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} = 0,11$. Интенсивность упрочнения при аналогичной погрешности для

степеней деформации 0,1 и 0,36 снизится с 1,93 до 0,77 МПа соответственно. В результате

снижения интенсивности упрочнения ($D\sigma_s/D\varepsilon$) для $\varepsilon = 0,36$ влияние δV_d на относительную погрешность высоты поковки (δh) становится сопоставимым с влиянием δV_h (рис. 3).

Для оценки совместного влияния факторов на относительную погрешность высоты поковки был реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) 2^4 , в котором исследовалось влияние четырех факторов (δV_h , δV_d , ε и d/h), факторы устанавливались на двух уровнях: δV_h , δV_d – 5 % и 10 %; ε – 0,1 и 0,36; d/h – 1,5 и 3,0.

При статистической обработке результатов ПФЭ 2^4 [4] получена следующая адекватная математическая модель в кодированном масштабе уровней факторов (приводится с сокращениями для удобства анализа):

$$\delta h(\%) = 10,17 + 2,33 \cdot \delta V_h + 1,27 \cdot \delta V_d + 1,19 \cdot \varepsilon - 1,11 \cdot \frac{d}{h} + 0,71 \cdot \delta V_d \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

Из анализа уравнения регрессии (2) следует, что наибольшее влияние на погрешность высоты осаживаемой поковки оказывает погрешность высоты исходной заготовки (δV_h). Это влияние почти в 2 раза сильнее влияния δV_d . Необходимо также отметить, что сила влияния ε и δV_d на δh практически одинакова. Отношение размеров поковки (d/h) влияет на δh со знаком минус, т.е. при увеличении значения d/h относительная погрешность высоты поковки уменьшается. Из эффектов парного взаимодействия выделяется совместное влияние погрешности диаметра заготовки (δV_d) и степени деформации (ε), которая вызывает упрочнение материала. В частности, увеличение степени деформации исходной заготовки уменьшает доминирующее влияние погрешности высоты заготовки. На рис. 4 анализ модели (2) представлен в виде диаграммы.

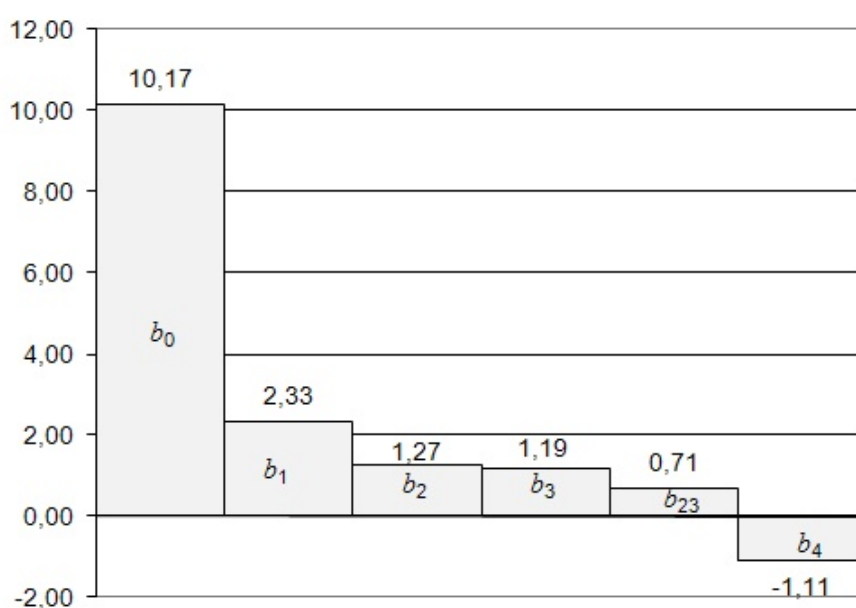


Рис. 4. Диаграмма регрессионного анализа математической модели ПФЭ 2^4

Регрессионный анализ результатов ПФЭ 2^4 , который позволяет выявить функциональную зависимость отклика от факторов и их взаимодействий, был дополнен дисперсионным анализом. Дисперсионный анализ применяется для объективного выделения факторов, оказывающих наиболее сильное (доминирующее) влияние на отклик. В дисперсионном анализе дисперсия отклика раскладывается на компоненты – дисперсии, обусловленные различными факторами, – или результирующая сумма квадратов отклика раскладывается на компоненты, соответствующие отдельным факторам. На рис. 5 представлена диаграмма дисперсионного анализа. Из этой диаграммы следует, что наибольший вклад в дисперсию отклика вносит погрешность объема исходной заготовки, вызванной отклонением ее высоты – δV_h (52,5 %), вклад δV_d и ε сопоставимы (15,7 % и 13,8 % соответственно), для d/h – 11,8 %, а вклад взаимодействия δV_d и ε – 4,9 %.

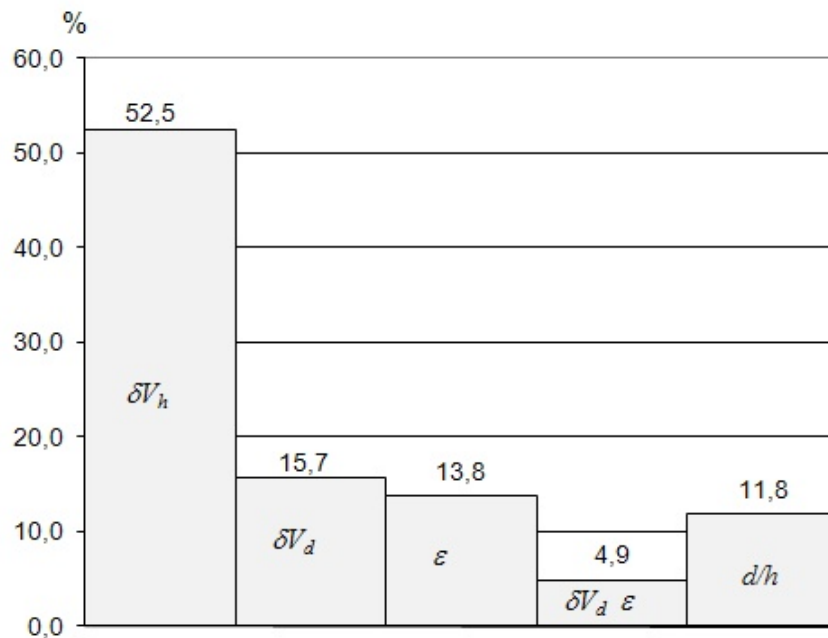


Рис. 5. Диаграмма дисперсионного анализа математической модели ПФЭ 2^4 .

По результатам ПФЭ 2^4 были также получены частные модели 2^3 для различных степеней деформации, т.к. величина степени деформации имеет существенное значение при определении δh и по существу при заданных размерах поковки является средством управления точностью процесса осадки.

Для степени деформации $\varepsilon = 0,1$ (калибровка):

$$\delta h(\%) = 8,78 + 2,42 \cdot \delta V_h + 0,53 \cdot \delta V_d - 0,45 \cdot \frac{d}{h} \quad (3)$$

и $\varepsilon = 0,36$ (осадка):

$$\delta h(\%) = 11,03 + 2,3 \cdot \delta V_h + 2,05 \cdot \delta V_d - 0,91 \cdot \frac{d}{h}. \quad (4)$$

Анализ моделей (3) и (4) позволяет сделать заключение, что влияние погрешности высоты исходной заготовки (δV_h) на относительную погрешность высоты поковки δh наиболее существенно при калибровке, оно почти в 5 раз сильнее влияния погрешности диаметра заготовки (δV_d) и отношения d/h . Сила влияния погрешности диаметра заготовки (δV_d) возрастает при больших степенях деформации, она становится сопоставимой с силой влияния (δV_h). Также можно отметить различное влияние отношения d/h на погрешность высоты поковки при калибровке и собственно осадке. При калибровке ($\varepsilon = 0,1$) отношение d/h влияет незначительно, а при осадке ($\varepsilon = 0,36$) его влияние возрастает при сохранении характера влияния – с увеличением d/h погрешность δh уменьшается.

Выводы. При осадке на гидравлических прессах для обеспечения точности высотных размеров поволоков следует предъявлять более высокие требования к точности высоты исходных заготовок. Следует четко разделить осадку на калибровку ($\varepsilon \leq 0,1 \dots 0,15$) и собственно осадку ($\varepsilon \geq 0,15$), т.к. сила влияния факторов на точность осадки при разных степенях деформации исходной заготовки существенно меняется. При осадке с большими степенями деформации необходимо предъявлять повышенные требования, как к точности высоты исходной заготовки, так и диаметра. При калибровке погрешность диаметра заготовки оказывает меньшее влияние на точность высотных размеров поволоков.

Список литературы:

1. Банкетов А.Н., Бочаров Ю.А., Добринский Н.С., Ланской Е.Н., Прейс В.Ф., Трофимов И.Д. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для машиностроительных вузов / Под ред. А.Н. Банкетова, Е.Н.Ланского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1982. 576 с.
2. Ланской Е.Н. Влияние жесткости процесса штамповки на точность // Повышение точности и автоматизация штамповки иковки : сборник работ. М.: Машиностроение, 1967. С. 21-30.
3. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
4. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.

Factors affecting the accuracy of upsetting at stamping on a hydraulic press

12, December 2012

DOI: [10.7463/1212.0500313](https://doi.org/10.7463/1212.0500313)

Vyatkin A.G., Vyatkin A.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch

m1@bmstu-kaluga.ru

The process of cold upsetting of cylindrical work pieces on a hydraulic press was investigated. It was shown that errors of height and diameter of initial work pieces affected the accuracy of forged piece's height in different ways. The degree of deformation of basic work pieces and relative sizes of forgings significantly altered the degree of influence of those errors on accuracy of forging.

Publications with keywords: [draft](#), [hydraulic press](#), [precision forgings](#), [cold forging](#)

Publications with words: [draft](#), [hydraulic press](#), [precision forgings](#), [cold forging](#)

References

1. Banketov A.N., Bocharov Iu.A., Dobrinskii N.S., Lanskoï E.N., Preis V.F., Trofimov I.D. *Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie* [Forging and stamping equipment]. Moscow, Mashinostroenie, 1982. 576 p.
2. Lanskoï E.N. Vliianie zhestkosti protsessa shtampovki na tochnost' [The influence of hardness of the process of stamping on the accuracy of the]. In: *Povyshenie tochnosti i avtomatizatsiia shtampovki i kovki : sbornik rabot* [Increase the accuracy and automation of stamping and forging : collection of works]. Moscow, Mashinostroenie, 1967, pp. 21-30.
3. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriia obrabotki metallov davleniem* [Theory of plastic metal working]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 424 p.
4. Novik F.S., Arsov Ia.B. *Optimizatsiia protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniia eksperimentov* [Optimization of processes of technology of metals by methods of planning of experiments]. Moscow, Mashinostroenie; Sofiia, Tekhnika, 1980. 304 p.