

**В.А. Дёмин, д.т.н.**  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)  
E-mail: va\_demin@bk.ru

## **Технологические отказы в листовой штамповке**

*Рассмотрены критерии прогнозирования технологических отказов в листовой штамповке. Особое внимание уделено отказам в виде разрушения заготовки и потери устойчивости в процессе деформирования.*

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением; листовая штамповка; прогнозирование технологических отказов.

**V.A. Demin, Dr. Sc. Tech.**  
(Bauman State Technical University of Moscow,  
Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005)

## **Technological failures in sheet stamping**

*The prediction criteria of technological failures in sheet stamping are considered. Particular attention is paid to failures as billet destruction and stability loss during deformation.*

**Keywords:** metal forming; sheet stamping; prediction of technological failures.

Методы прогнозирования технологических отказов приобретают особое значение при разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов и операций, а также при синтезе управляющих программ для технологического оборудования с программным управлением.

С прогнозированием технологических отказов связана одна из важнейших задач теории обработки металлов давлением – задача о назначении числа переходов и выборе геометрии инструмента на переходах. При этом, проектирование технологических процессов листовой штамповки связано с необходимостью прогнозирования технологических отказов [1], которые связаны с предельными деформациями. В дальнейшем понимаем под предельными деформациями – деформации, при достижении которых появляется тот или иной браковочный признак. При этом в некоторых случаях имеются в виду характеристики де-

формации заготовки в целом (например, предельная глубина вытягиваемой детали, предельная степень осадки и т.д.), в других же – непосредственно предельная деформация материала.

Анализ производственного опыта и имеющихся исследований, показывает, что основными технологическими отказами, ограничивающими возможность реализации толстолистовой штамповки и приводящими к отбраковке изделий, являются:

- неустойчивость пластического деформирования при растяжении в форме чрезмерных локальных утонений с последующим разрушением;
- разрушение обрабатываемого материала вследствие исчерпания его пластичности (без предварительной локализации деформации);
- потеря устойчивости сжатия, сопровождающаяся образованием неразглаженных волн, гофр (складок);

- потеря точности формы изготавливаемой детали в результате упругой деформации материала после снятия деформирующей силы.

Выполненный анализ видов технологических отказов, характерных для формообразующих операций толстолистовой штамповки, позволяет сделать вывод о том, что *наиболее существенными, доминирующими видами браковочных признаков, присущих этим операциям, являются:*

- локализация деформации с последующим разрушением;

- разрушение из-за недостаточной пластичности материала заготовки.

Решение поставленной задачи невозможно без анализа напряженно-деформированного состояния заготовки. Для решения задач листовой штамповки используют техническую теорию пластин [2].

Основное кинематическое ограничение, принимаемое в технической теории пластин, называют обычно гипотезой прямых нормалей. Оно аналогично гипотезе плоских сечений теории изгиба, которую в технической литературе называют «гипотезы прямых нормалей, плоских сечений или Кирхгофа».

В основе этой гипотезы лежит предположение о том, что прямолинейные элементы, нормальные к срединной плоскости заготовки до деформации, остаются после деформации прямыми, нормальными к деформированной срединной поверхности и длины этих элементов не меняются.

Такие предположения вполне приемлемы для тонкостенных деталей, когда отношение  $S/R \ll 1$  (где  $S$  – толщина заготовки;  $R$  – наименьший из радиусов главных кривизн), поскольку погрешность, вносимая этим предположением, есть величина малая (порядка  $S/R$ ) сравнительно с единицей [2].

В тоже время учитываем слова акад. Ю.Н. Работнова «...закон плоских сечений и не соблюдается, полученные на основе его выводы оказываются весьма точными (если, конечно,  $S/R \ll 1$ )».

Фактически такие же ограничения вводит Е.А. Попов [3], который отмечает, что «для тонкой заготовки, у которой радиус кривизны срединной поверхности больше пяти толщин, с достаточной точностью можно использовать известные уравнения равновесия для тонкостенных оболочек».

Поэтому можно сделать вывод о том, что при использовании широко применяемых уравнений равновесия, необходимо очень

внимательно относиться к постановке задачи для случая, когда  $R/S < 5$ .

При решении задач листовой штамповки с использованием прикладных программ, необходимо учитывать соотношение радиуса к толщине. Программы, в которых используются элементы оболочки (AutoForm, PamShtamp и др.) применимы при отношении  $R/S > 5 \dots 10$ . Если соотношение  $R/S < 5 \dots 10$ , то необходимо использовать программы, где можно разбить толщину минимум на пять элементов, например QForm, DForm и др.

Определение напряженно-деформированного состояния позволяет прогнозировать разрушение заготовки.

При соотношении  $R/S < 5 \dots 10$ , можно использовать критерии, разработанные для объемной штамповки. В настоящее время, наиболее широкое применение получил критерий деформируемости без разрушения В.Л. Колмогорова [4]:

$$\Psi = \int_0^{t_k} E(t - \tau) b(\tau) \frac{\varepsilon_0(\tau)}{\varepsilon_{пр}(\eta_k)} d\tau < 1, \quad (1)$$

где  $\Psi$  – параметр, характеризующий степень использования запаса пластичности (СИЗП);  $\tau$ ,  $t$  – время или некоторый заменяющий его параметр;  $E(t - \tau)$  – коэффициент, учитывающий «самозалечивание» дефектов при высоких температурах и монотонно убывающий от 1 до 0 с увеличением аргумента;  $b$  – коэффициент, учитывающий историю деформирования;  $\varepsilon_0$  – накопленная деформация;  $\varepsilon_{пр}$  – предельное значение накопленной деформации.

Использование этого критерия затруднено тем, что в литературе не приводятся данные о значениях коэффициентов  $E$  и  $b$  при различных процессах пластического деформирования. Поэтому эти коэффициенты обычно принимают равными единице, а критерий (1) принимает вид:

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_0} \frac{d\varepsilon_0}{\varepsilon_{пр}(\eta_k)} < 1, \quad (2)$$

где  $\bar{\varepsilon}_0$  – накопленная деформация к моменту  $t_k$ .

Отметим аналогию между приведенным условием деформируемости и линейным законом суммирования повреждений в условиях ползучести и при циклических нагружениях.

В настоящее время широко используется критерий разрушения по Коккрафту – Лэтэма [6].

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{\sigma_1^+}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}_p, \quad (3)$$

где  $\bar{\varepsilon}_p$  – приращение накопленной пластической деформации;  $\sigma_1^+$  – максимальное растягивающее напряжение;  $\bar{\sigma}$  – интенсивность напряжений.

Для сложного нагружения Ю.Г. Калпиным [7] предложен следующий критерий деформируемости:

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_0} \left( n\varphi_0 \varepsilon_0^{n-1} + \frac{\varphi_0 \varepsilon_{np}^n(\eta_k)}{\varepsilon_{np}(\eta_k)} \right) d\varepsilon_0 < 1, \quad (4)$$

где  $\varphi_0$  и  $n$  – коэффициенты, определяемые экспериментально. При этом  $\varphi_0$  определяется из испытаний на пластичность при сложных программах нагружения.

Критерий (3) учитывает влияние инвариантов напряженного состояния, упрочнение металла, историю деформирования и дает хорошие результаты, но использование его затруднено в связи с необходимостью определения  $\varphi_0$ .

Для оценки применимости критериев для листовой штамповки было проведено моделирование процесса отбортовки [8] в программе QForm, с использованием подпрограмм, написанных в формате .Lua.

Результаты расчета процесса отбортовки показали, что для операции отбортовки наибольшую точность при определении места появления трещин, показал критерий Колмогорова.

При соотношении  $R/S > 5 \dots 10$ , можно использовать диаграммы предельных деформаций, которые часто называют Forming Limit Diagram (FLD) или диаграммами Килера-Гудвина. На этих диаграммах построены опытным путем предельные кривые деформирования или Forming Limit Curve (FLC).

Пример FLD диаграммы и построенной кривой FLC для стали DC04 толщиной 1 мм показан на рис.1.

Параметр вида деформированного состояния  $\alpha$  и величину предельной деформации разрушения  $e_1^{**}$  и в момент потери устойчивости  $e_1^*$  в каждом виде испытаний определяют методом делительных сеток. Предельные деформации, соответствующие разрушению, рассчитывают по искажению нескольких ячеек, непосредственно прилегающих к месту разрыва, но не пересекаемых трещиной. Зона положительных значений  $\alpha$  соответствует двухосному растяжению, при отрицательных величинах  $\alpha$  имеет место сочетание сжатия с растяжением [9]. Предполагается, что ниже диаграмм разрушения находится зона безопасных условий штамповки, а выше – зона

возможного разрушения. При прогнозировании разрушения формуемой детали с помощью диаграмм разрушения представляется возможность учесть не только неравномерность распределения деформаций по сечению тестируемой детали, но и их локальность.

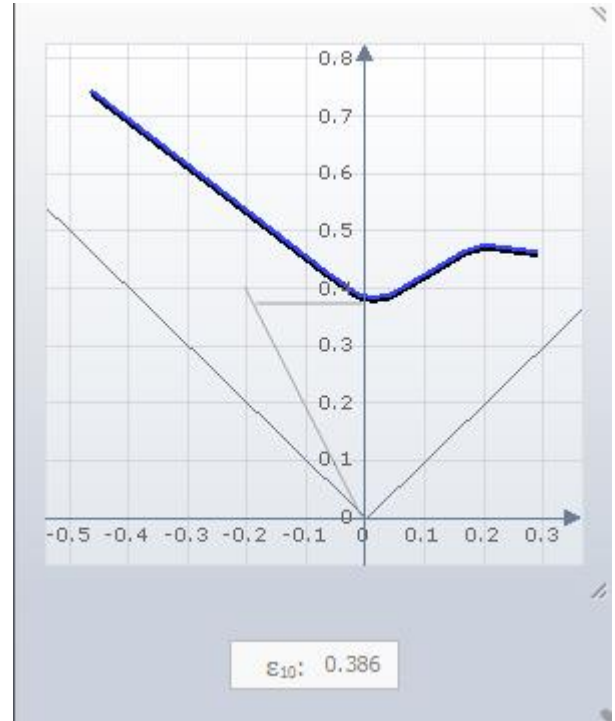


Рис. 1. FLD-диаграмма для стали DC04 толщиной 1мм

Пример диаграммы предельной формоустойчивости приведен на рис. 2.

Диаграмма разрушения (ДР) листового материала имеет важное практическое значение в двух случаях:

- 1) деформация разрушения меньше предельной устойчивой деформации;
- 2) в силу особенностей деформирования, потери устойчивости в форме локализации деформаций вообще не происходит.

Если известно деформированное состояние на данной операции, т.е. значения  $\alpha$  и  $e_1$  в различных точках заготовки, то о возможности ее разрушения в процессе реализации этой операции судят по положению точек с координатами  $\alpha$  и  $e_1$  относительно ДР. Если эти точки расположены ниже ДР, то при выполнении данной операции разрушения не произойдет. Условие отсутствия разрушения при использовании ДР записывают в виде  $e_1 < e_1^{**}$ . Изложенный способ нашел широкое применение при назначении числа переходов в системах компьютерного проектирования операций листовой штамповки [10].

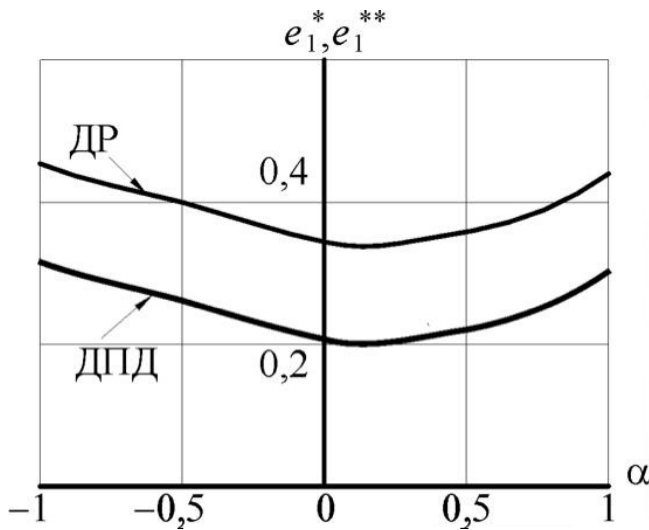


Рис. 2. Диаграммы предельной формемости

Экспериментальными [11] и теоретически [12] исследованиями установлено, что возникновение сосредоточенного утонения в виде шейки еще не означает разрушения. Листовой материал в течение некоторого времени после потери устойчивости продолжает сохранять способность к дальнейшему формоизменению. Однако для обеспечения стабильности процесса деформирования и гарантированного получения качественных деталей предельную деформацию целесообразно устанавливать по моменту возникновения сосредоточенного утонения.

Согласно критерию, предложенному в работе [13], пластическое деформирование устойчиво, если положительны добавочные нагрузки

$$dP_i > 0. \quad (5)$$

С использованием этого критерия решен ряд задач, касающихся устойчивости пластического деформирования листовых материалов.

В соответствии с критерием Б. Старакерса [14] пластическое деформирование устойчиво, если положительна работа добавочных нагрузок:

$$\sum dP_i dl_i, \quad (6)$$

где  $l_i$  – обобщенные перемещения, на которых совершают работу обобщенные силы  $P_i$ . В случае пропорционального нагружения, т.е. силы  $P_i$  изменяются пропорционально некоторому параметру, критерии (4) и (5) совпадают.

Результаты экспериментальной проверки указанных критериев, получивших название инженерных, показали, что в лучшем соответствии с экспериментальными данными находится критерий (5).

Следует отметить, что ДПД, построенная по результатам экспериментов, является характеристикой не материала, а конкретного листа, так как она сильно зависит от разнотолщинности листа и неоднородности его механических свойств. Это обстоятельство обуславливает необходимость проведения испытаний с целью построения ДПД для каждой партии листового материала.

Колебания механических и геометрических свойств заготовки необходимо учитывать при проектировании технологических процессов.

При анализе технологических операций листовой штамповки основой для расчета являются кривые упрочнения и условия перехода металла из упругого в пластическое состояние. Для построения кривых упрочнения рекомендуется использовать уравнение:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{\psi}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести на растяжение;  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву;  $\psi = \delta / (1 + \delta)$  – относительное уменьшение площади поперечного сечения;  $\delta$  – относительное удлинение, которое можно получить из ГОСТ на листовую металл.

Построим кривые упрочнения для стали 08Ю СВ, по ГОСТ 9045-93 для толщины 0,7...1,5 мм; механические характеристики металла находятся в пределах  $\delta > 0,34$ ;  $\sigma_s < 205 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_B = 250...380 \text{ Н/мм}^2$ .

Анализ кривых упрочнения, представленных на рис. 3 показывает, что при таком диапазоне изменения напряжений и деформаций, даже для одной группы штампуемости, при расчете технологического процесса необходимо учитывать колебания напряжений. В работе [15] показано, что изменение кривой упрочнения может оказывать существенное влияние на максимальные радиальные напряжения при вытяжке.

Вторая зависимость, которая используется при решении технологических задач листовой штамповки, – это условия пластичности Губера–Мизеса или Треска–Сен-Венана. На рис. 3 показано в каких пределах изменяются условия пластичности для стали 08Ю СВ по ГОСТ 9045-93.

Анализ представленной информации позволяет рекомендовать использовать условие Треска–Сен-Венана для аналитических решений, так как аналитическое решение существенно упрощается. Условие пластичности Гу-

бера–Мизеса можно рекомендовать для численных решений, так как при численных решениях не рекомендуется использовать зави-

симости с резким изменением условий деформации.

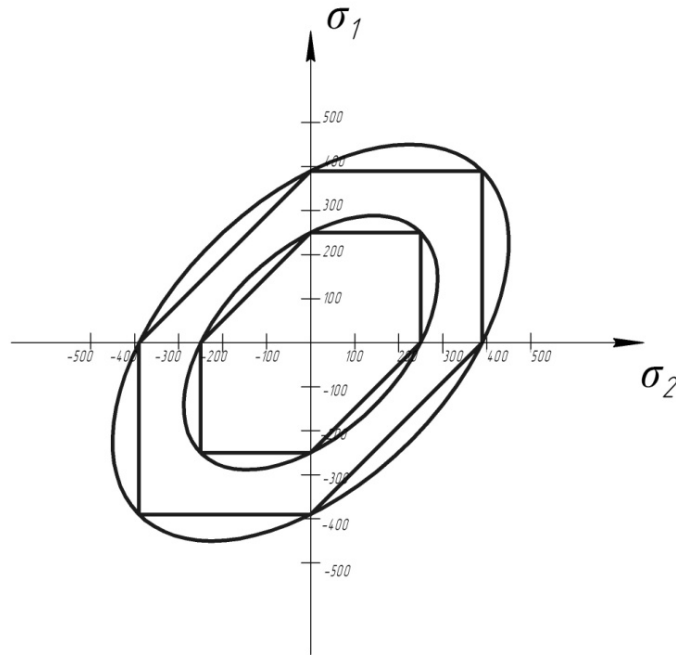


Рис. 3. Условие пластичности для стали 08Ю СВ

Анализ рис. 3 показывает, что разница между условиями пластичности намного меньше колебаний механических свойств по ГОСТ. Это позволяет сделать вывод о том, что при анализе реальных технологических процессов при необходимости заказа конкретного материала по ГОСТ, важнее учитывать изменение механических свойств, а не форму записи условия пластичности.

### Заключение

Программы, в которых используются элементы оболочки (Auto Form, Pam Shtamp и др.) применимы при отношении  $R/S > 5 \dots 10$ . Если соотношение  $R/S < 5 \dots 10$ , то необходимо использовать программы, например QForm, DForm и др., где можно разбить толщину минимум на пять элементов.

Диаграммы предельно-устойчивых деформаций обеспечивают более точное прогнозирование технологических отказов в листовой штамповке.

Условие пластичности Треска – Сен-Венана можно рекомендовать для аналитических решений, а условие пластичности Губера – Мизеса для численных решений, при решении прикладных задач листовой штамповки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дёмин, В.А. Разработка метода проектирования технологических процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов / Дисс.на соискание ученой степени д. т. н. / Москва, 2003. 342 с.
2. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
3. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 331 с.
4. Колмогоров, В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
5. Cockroft M.G., Latham D.J. Ductility and the workability of metals // J. Inst. Metals. – 96. 33. – 1968.
6. Власов, А.В. О применении критерия Кокрофта-Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объёмной штамповке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 11-1. – С. 46-58.
7. Калпин, Ю.Г., Филиппов, Ю.К. Влияние упрочнения на пластичность металла при холодной деформации. – М.: МАМИ, 1989. – С. 37-42.
8. Дёмин В.А., Ромасенко А.В., Костылев В.А. Отбортовка отверстия под резьбу более М6 // Заготовительное производство в машиностроении. – 2017. – Т.15. – №8. – С. 357 – 360.
9. Томилов, М.Ф., Попов, С.П., Шагунов, А.В., Томилов, Ф.Х. Прогнозирование технологических отказов

при формообразовании эластичными средами деталей из листа // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 11. – С. 3–7.

10. Дель, Г.Д., Нестеренко, А.В. Математическое моделирование и оптимизация операции глубокой вытяжки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 9. – С. 2-5.

11. Janinier J.M. Calculation of the forming limit curve at fracture // Journal of material science. – 1983. – Vol. 18. – № 6. – pp. 1794-1802.

12. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

13. Людвик, П. Основы технологической механики // В сборнике «Расчеты на прочность». Вып. 15. – М.: Машиностроение, 1970. – С. 130-166.

14. Storakes B. Plastic and visco-plastic instability of a thin tube under internal pressure, torsion and axial torsion. JJMS, – 1968, – vol. 10. – № 6. – pp. 510-529.

15. Дёмин, В.А. Инновационные технологии в обработке металлов давлением для транспортного машиностроения // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – №8(98). – С. 3-7.

16. Дёмин, В.А. Бадюлин, Д.Н. Влияние отклонения характеристик заготовок на результаты расчета процессов обработки давлением // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – №12(54). – С. 41-44.

## REFERENCES

1. Demin, V.A. Development of method for designing engineering processes of thick-sheet stamping based on technological failure prediction / Thesis for Dr. Sc. Tech. degree / Moscow, 2003. pp. 342.

2. Rabotnov, Yu.N. *Deformed Solid Mechanics*. – М.: Science, 1979. – pp. 744.

3. Popov, E.A. *Fundamentals of Sheet Stamping Theory*. – М.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 331.

4. Kolmogorov, V.L. *Stresses. Deformations. Destruction*. – М.: Metallurgy, 1970. – pp. 229.

5. Cockroft M.G., Latham D.J. Ductility and the workability of metals // J. Inst. Metals. – 96. 33. – 1968.

6. Vlasov, A.V. On application of Cockroft-Latham criterion for destruction prediction at cold die forging // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2017. – No.11-1. – pp. 46-58.

7. Kalpin, Yu.G., Filippov, Yu.K. *Impact of Strengthening upon Metal Ductility at Cold Deformation*. – М.: MAMI, 1989. – pp. 37-42.

8. Demin, V.A., Romasenko, A.V., Kostylev, V.A. Hole flanging for thread more than M6 // *Pre-production in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol.15. – No.8. – pp. 357-360.

9. Tomilov, M.F., Popov, S.P., Shagunov, A.V., Tomilov, F.H. Technological failure prediction at sheet part shaping with elastic environments // *Forge-Stamping Production*. – 2000. – No.11. – pp. 3-7.

10. Del, G.D., Nesterenko, A.V. Mathematical modeling and optimization of deep-drawing // *Forge-Stamping Production*. – 1993. – No.9. – pp. 2-5.

11. Janinier J.M. Calculation of the forming limit curve at fracture // Journal of material science. – 1983. – Vol. 18. – № 6. – pp. 1794-1802.

12. Malinin, N.N. Applied Theory of Ductility and Creeping. – М.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 400.

13. Lyudvik, P. Fundamentals of technological mechanics // *In Collection "Strength Calculations"*. Issue 15. – М.: Mechanical Engineering, 1970. – pp. 130-166.

14. Storakes B. Plastic and visco-plastic instability of a thin tube under internal pressure, torsion and axial torsion. JJMS, – 1968, – vol. 10. – № 6. – pp. 510-529.

15. Demin, V.A. Innovation technologies in metal forming for transport engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.8(98). – pp. 3-7.

16. Demin, V.A., Badulin, D.N. Impact of billet characteristics deviation upon calculation results of metal forming // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.12(54). – pp. 41-44.

Рецензент д.т.н. С.Н. Ларин