

УДК621.983.044

Тараненко М. Е.

## МЕТОД СНИЖЕНИЯ КОРОбЛЕНИЯ ЛИСТОШТАМПОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Явление коробления (поводок или искажения форм деталей после штамповки) крупногабаритных листовых деталей становится серьёзной проблемой на пути повышения их точности. Это явление препятствует широкому использованию роботизированной сборки автомобилей, не позволяет получать сверхточные зеркала антенн космической связи и детали других современных точных приборов и устройств. Проблема коробления и поводок усугубляется при расширении использования высокопрочных деформационно-упрочняемых материалов (сталей, алюминиевых и других сложных сплавов).

Существует довольно много способов снижения остаточных напряжений, вызывающих коробления и поводки отштампованных деталей. В основном, это способы термического или термомеханического воздействия на изготовленные детали. На этом фоне выделяется несколько способов, основанных на наложении на листовые детали различных физических полей, например, ультразвуковых определённой частоты, импульсных магнитных полей и др. Чаще всего эти способы реализуются как отдельная операция, выполняемая после операций формоизменения. В общем, такие технологические процессы усложняют производство и увеличивают его затраты.

Необходимо стремиться к созданию таких технологических процессов, которые совмещали бы формоизменение и релаксацию остаточных напряжений.

Коробление листовой детали или потеря его генеральной формы – это проявление технологической наследственности, определяемое наличием в материале детали неравномерных полей упругих напряжений. В очень простом виде параметр пружинения для простой операции формоизменения – гибки прямолинейного борта, можно записать в виде Е. И. Исаченкова [1]:

$$\Delta\varphi = \left[ \frac{\sigma_T}{E} + 2 \frac{P}{E} (2\bar{r} + 1)^{-1} \right] (\bar{r} + 1)\varphi,$$

где  $\sigma_T$  ( $\sim \sigma_S$ ) – экстраполированный предел текучести;

$E$ ,  $P$  – модули упругости и упрочнения при линейном законе упрочнения;

$\bar{r} = r/\delta$  – относительный к толщине заготовки радиусгиба;

$\varphi$  – уголгиба или степень формоизменения при операциигиба.

Рассмотрим влияние на параметр пружинения  $\Delta\varphi$  составляющих его величину факторов. Ими можно управлять и влиять на величину пружинения. Для этого используем представление процесса начала пластической деформации, изложенное в работе [1] (рис. 1). Процесс перехода от упругой области к пластической носит не монотонный характер, а прерывистый. Это многократно замечено и носит название эффекта Портевана-Ле Шаталье.

При растяжении металлических образцов после превышения напряжениями значения предела упругости  $\sigma_E$  начинается участок диаграммы растяжения, иногда называемый нелинейной упругостью. При этом в деформируемом теле накапливаются необратимые деформации. В реальных телах такое накопление деформаций будет сопровождаться разрывом внутрикристаллических связей между частицами вещества и последующим смещением целых кристаллографических плоскостей относительно друг друга в направлении деформирующего воздействия. Пластическая деформация осуществляется за счет самопроизвольного уменьшения действующих напряжений до их равновесного значения. Это явление называется релаксацией напряжений. Такая пластическая деформация происходит дискретно. Подтверждением этому является значительное возрастание акустической эмиссии в пределах этой

области деформирования [3], наличие петли гистерезиса [2]. Современные представления о механизме деформирования в области площадки текучести утверждают, что он носит волновой характер. Наложение на этот процесс вибрации определённого диапазона частот снижает сопротивление деформированию, уровень остаточных напряжений и потребные для формоизменения усилия [4].

Целью данной работы является исследование методов снижения коробления листоштампованных деталей.

Подобные явления, происходящие в деформируемом металле при воздействии на него нагружающих факторов подводного высоковольтного электрического разряда, отмечены в работе Г. А. Гулого [5]. В работе [6] установлено влияние на период релаксации напряжений величин относительной деформации и её скорости.

Отсюда можно сделать практические выводы. Для снижения пружинения ( $\Delta\varphi$ ) необходимо прикладывать импульсное деформирующее нагружение заготовки в период возникновения в ней напряжений текучести  $\sigma_s$ . Частота импульсного деформирующего нагружения должна быть близка к частоте релаксации напряжений для конкретного материала. Для разных листовых материалов диапазон периода релаксации находится в пределах 30...120 мкс.

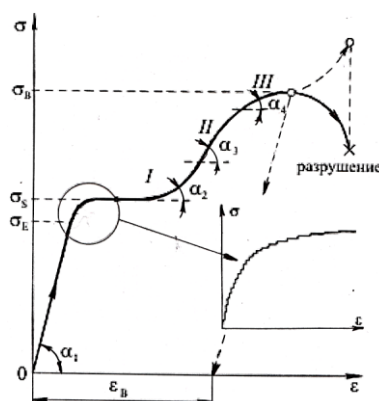


Рис. 1. Диаграмма одноосного растяжения металлов (на выноске – прерывистая текучесть (эффект Портевена-Ле Шателье)):

$\sigma_E$  – предел упругости;  $\sigma_s$  – напряжение текучести;  $\sigma_B$  – временный предел текучести;  $\varepsilon$  – относительная деформация; I, II, III – этапы упрочнения;  $\Delta\alpha_{1-4}$  – линейные углы наклона кривой

Второе слагаемое в квадратных скобках приведённой зависимости прямо пропорционально отношению модулей упрочнения и упругости и обратно пропорционально относительному радиусугиба. Если режимы деформирования заготовки выбраны таким образом, что напряжения в заготовке близки к напряжениям кривой упрочнения в области I (рис. 1), то как видно, это отношение меньше единицы, что приводит к уменьшению суммы. Далее, чем больше относительный радиусгиба, тем больше сглажены участки сопряжения поверхностей, тем меньше влияние на параметр пружинения величин, заключённых в квадратные скобки.

Степень формоизменения или параметр  $\varphi$  прямым образом влияет на степень пружинения. Если имеется возможность предварительно изогнуть заготовку с радиусом кривизны несколько большим, чем задано чертежом детали, и распределить возникающие при этом деформации на больший участок поверхности детали, а затем калибровать заготовку до заданной величины  $\varphi$ , то влияние параметра степени формоизменения можно уменьшать.

Таким образом показано, что, используя определенные технологические приёмы, можно снижать степень пружинения или коробления.

Ответ на вопрос о реализации использования этих технологических приёмов даны в работе [7], где приведены диапазоны пространственно-временного управления нагружением на многоконтурном электрогидравлическом прессе ПЭГ-ХАИ-500. Эти возможности

закljučаются в использовании последовательного и локального формоизменения и концентрации выделяемой энергии на определённых участках заготовки. Временные возможности управления реализуются управлением длительностью (периодом) импульса нагружения путем изменения ёмкости и индуктивности рабочих контуров, управлением временем подачи одного или нескольких нагружающих импульсов заданной амплитуды и их длительности – изменением межэлектродного расстояния.

Диапазоны управления этими параметрами соответствуют требованиям листовой штамповки. Стабильность поддержания задаваемых параметров довольно высокая. Предусмотрен интерактивный контроль режимов [7].

Достоверность приведённых рассуждений подтверждается результатами опытной штамповки крупногабаритных деталей разной конфигурации из различных материалов.

Одним из примеров построения техпроцесса штамповки крупногабаритной детали сверхвысокой точности является процесс изготовления параболических зеркал антенн космической связи. В этом случае для получения очень точной вогнутой поверхности параболоида вращения необходимо стремиться к максимальному уменьшению пластических деформаций (без участков их локализации) путем получения равномерного поля таких деформаций на всей поверхности детали.

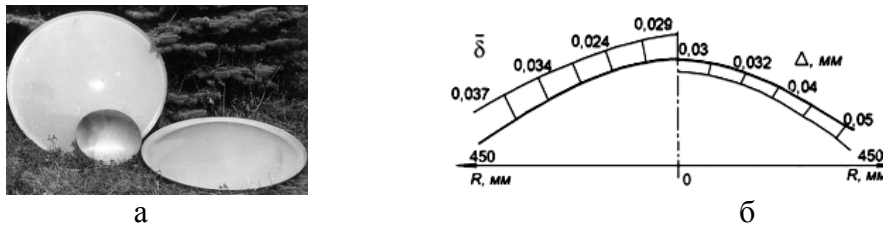


Рис. 2. Внешний вид отштампованных параболических зеркал  $\varnothing 900$  мм и 270 мм (а), распределения относительных деформаций утонения вдоль радиуса (б, слева) и значения отклонения профиля детали от профиля матрицы  $\Delta$  (б, справа)

Для этого на первом переходе в центре круглой заготовки формовалась выштамповка диаметром, равным половине диаметра зеркала и глубиной, при которой утонения в центре были равны утонениям по всему сечению профиля детали. На втором переходе полуфабрикат переворачивался, выштамповкой устанавливался на выпуклую часть оснастки, его фланцы прижимались к матрице прижимной плитой. Импульсное нагружение проводилось над периферийными зонами полуфабриката. Ширина кольцевой зоны нагружения была в пределах 130...150 мм. Это позволяло натягивать заготовку на выпуклую часть матрицы без интенсивного прижатия к последней. Для получения точного профиля периферийной части детали заготовка дважды проворачивалась вокруг своей оси на угол  $\sim 11^\circ$ . Заготовка штамповалась за 12–16 разрядов.

Период импульсов нагружения на уровне  $0,1P_{max}$  был равен 100...120 мкс. Материалами заготовки были: АМг2, АМцАМ, АД38, толщиной 2,0...2,5 мм. Отштампованные детали измерялись и сравнивались с заранее измеренной оснасткой.

Как видно из рис. 2, относительные деформации утонений вдоль образующей детали находятся в пределах 0,024...0,037, т. е. в пределах допуска на толщину листа. Зазор между стенкой детали и формообразующей поверхностью оснастки равен 0,03...0,05 мм, что значительно меньше нормированного значения допуска.

Для окончательной оценки полученной точности формы проводились радиотехнические измерения преобразованного электромагнитного сигнала. Они показали высокий коэффициент усиления сигнала  $39,7 \pm 1,2$  дБ для рабочей частоты 12,2 ГГц при ширине диаграммы направленности на уровне 3 дБ –  $1,8^\circ$ .

Практически полученные результаты свидетельствуют о почти полном отсутствии пружинения и упругих повóдок.

Вторым примером успешной реализации предлагаемого подхода к построению технологических процессов получения листовых деталей с минимальным короблением из

деформационно-упрочняющихся сталей является следующее. Было предложено опробовать применение электрогидравлической штамповки модели внутренней панели передней двери автомобиля «Форд» (рис. 3), которая представляет собой панель сложной генеральной формы в плане, имеющую изгиб генерального профиля и большое количество выпукло-вогнутых локальных элементов. Материал деталей – алюминиевый сплав AA5182 и сталь марок IF, ВН-210, ВН-240. Толщина листа 0,6...1,2 мм. Габаритные размеры 1203 × 1251 мм. Штамповка осуществлялась импульсами напряжений с периодом 100...150 мкс. Количество разрядов в 19...23 шт. Плотность потока выделенной энергии 1,78...6,33 кДж/дм<sup>2</sup>.

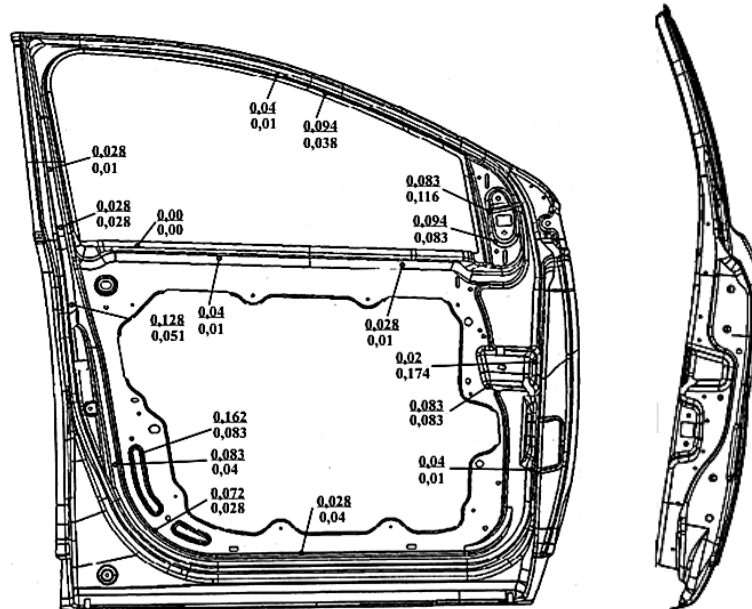


Рис. 3. Распределение логарифмических деформаций утонений, измеренных в отштамповках из материалов  $\frac{ВН\ 210}{ВН\ 240}$  перед калибровкой

Результаты последовательного локального деформирования с разными вариантами последовательности нагружения отдельных участков, количества разрядов и выделившейся энергии показаны на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Внешний вид участка отштамповки из стали IF толщиной 0,75 мм. Заметного коробления не отмечено



Рис. 5. Внешний вид отштамповки промежуточного типа. Для оценки степени коробления борта детали используется плоская линейка (изображена в верхней части рисунка)

Как видно из картины распределения логарифмических деформаций утонения (рис. 3), разница в их значениях довольно малая. Это свидетельствует об отсутствии зон локализации утонений, общем невысоком и равномерном уровне пластических деформаций и достаточно малых напряжениях, при которых произведено оформление генеральной формы детали. Безусловно, при калибровке локальных участков сопряжения бортов могут увеличиваться деформации утонения. Но перед заключительным этапом величина коробления соизмерима с толщиной детали (рис. 4, 5).

## ВЫВОДЫ

Многоимпульсная электрогидравлическая штамповка с определённым образом настроенными параметрами пространственного и временного (с заданным периодом импульса) нагружения позволяет изготавливать крупногабаритные листовые детали с минимальным (полным) отсутствием коробления (пружинения). Наиболее эффективны такие техпроцессы для изготовления деталей из современных деформационно-упрочняемых материалов, например, автокузовных панелей.

Реализация таких техпроцессов возможна на многоэлектродных электрогидравлических прессах с пространственно-временным управлением нагружения и высокой запасаемой энергией.

Очевидно, проблема большого коробления отштамповок, особенно из современных деформационно-упрочняющихся материалов, не может быть устранена только технологическими способами. Необходима разработка требований к технологичности конструкции детали, позволяющих снизить коробление. Для уменьшения остроты проблемы коробления необходимы углубленные исследования физического механизма релаксации остаточных напряжений при реализуемых значениях деформаций и их скоростях порядка  $10^1 \dots 10^3 \text{ сек}^{-1}$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст] / Е. И. Исаченков. – М. : Машигиз, 1962. – 328 с.
2. Дідик Р. П. Фізичні основи міцності : підручник [Текст] / Р. П. Дідик, Е. В. Кузнецов і В. М. Забара. – Д. : Наука та освіта, 2005. – 608 с.
3. Лесников А. В. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением [Текст] / А. В. Лесников, А. П. Агеев, Д. П. Кузнецов и др. – С-Пб. : Внешторгиздат, 1995. – 527 с.
4. Северденко В. П. Листовая штамповка с ультразвуком [Текст] / В. П. Северденко, В. С. Пащенко, В. С. Кособуцкий. – Минск : Наука и техника, 1975. – 192 с.
5. Гулій Г. А. Научные основы разрядно-импульсных технологий [Текст] / Г. А. Гулій. – К. : Наук. Думка, 1990 – 208 с.
6. Косенков В. М. Метод определения реологических и энергетических характеристик ударного сжатия металлов [Текст] / В. М. Косенков, В. М. Бычков. – ПМТФ, 2012. – Т. 53, № 6. – С. 134–143.
7. Тараненко М. Е. Электрогидравлическая штамповка: тория, оборудование, техпроцессы : монография в 2 ч. [Текст] / М. Е. Тараненко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2011. – 272 с.

## REFERENCES

1. Isachenkov E. I. Shtampovka rezinoj i zhidkost'ju [Tekst] / E. I. Isachenkov. – M. : Mashgiz, 1962. – 328 s.
2. Didik R. P. Fizichni osnovi micnosti : pidruchnik [Tekst] / R. P. Didik, E. V. Kuznecov i V. M. Zabara. – D. : Nauka ta osvita, 2005. – 608 s.
3. Lesnikov A. V. Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniju v prilozenijah k pro-cessam obrabotki metallov davleniem [Tekst] / A. V. Lesnikov, A. P. Ageev, D. P. Kuznecov i dr. – S-Pb. : Vneshtorgizdat, 1995. – 527 s.
4. Severdenko V. P. Listovaja shtampovka s ul'trazvukom [Tekst] / V. P. Severdenko, V. S. Pashhenko, V. S. Kosobuckij. – Minsk : Nauka i tehnika, 1975. – 192 s.
5. Gulyj G. A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij [Tekst] / G. A. Gulij. – K. : Nauk. Dumka, 1990 – 208 s.
6. Kosenkov V. M. Metod opredelenija reologicheskikh i jenergeticheskikh harakteristik udarnogo szhatija metallov [Tekst] / V. M. Kosenkov, V. M. Bychkov. – PMTF, 2012. – T. 53, № 6. – S. 134–143.
7. Taranenko M. E. Jelektrogidravlicheskaja shtampovka: torija, oborudovanie, tehprocessy : monografija v 2 ch. [Tekst] / M. E. Taranenko. – H. : Nac. ajerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI», 2011. – 272 s.

Тараненко М. Е. – д-р техн. наук, проф. НАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

НАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.

E-mail: [m.taranenko@khai.edu](mailto:m.taranenko@khai.edu)