Э. Ц. Галсанова^{1,2}, А. Д. Грешилов¹, Я. В. Калинин², А. А. Яковлев²

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК
ПРИ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ**

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

² Волгоградский государственный технический университет

E-mail: erjena_g@mail.ru

Представлен обзор новых теоретических исследований в области методов нагрева горячей листовой штамповки особопрочных металлических сплавов и постановка задач исследования.

Ключевые слова: методы нагрева, горячая штамповка, листовая штамповка, нагревательная установка, нагревание.

E. Ts. Galsanova^{1,2}, A. D. Greshilov¹, Ya. V. Kalinin², A. A. Yakovlev²

**INVESTIGATION OF METHODS OF HEATING WORKPIECES
DURING HOT SHEET STAMPING**

¹ East Siberia State University of Technology and Management

² Volgograd State Technical University

An overview of new theoretical studies in the field of methods of heating hot sheet stamping of extra-strong metal alloys and the formulation of research tasks is presented

Keywords: temperature stresses, hot stamping, sheet stamping, heating unit, heating.

Введение

Для повышения качества изделий совершенствуют технологию листовой горячей штамповки, стремясь максимально приближать форму и размеры заготовки к форме и размерам готовой детали [1]. При этом необходимо минимизировать влияние упругой отдачи или

пружинения листовых заготовок из высокопрочных материалов при помощи подбора метода и оборудования для нагрева, позволяющие получить как можно более равномерный нагрев в необходимой зоне заготовки. Это бы обеспечивало равномерное распределение напряжений по площади заготовки.

Исследования в области технологии горячей листовой штамповки

Технология листовой горячей штамповки включает следующие этапы: определение размеров заготовки, выбор исходного материала, составление карты раскроя, при горячей штамповке выбор метода и оборудования для нагрева и т. д. Порядок следования таких этапов условен, так как выбор метода и оборудования для нагрева будет влиять на размеры заготовки, соответственно на составление карты раскроя. Так, например, при использовании электроконтактного метода предусматривают место для крепления контактов, которые впоследствии вырезают. В исследованиях [2] было экспериментально определено влияние технологии нагрева на упругую отдачу. Падение температуры материала во время ручного переноса из печи в фильеру и падения температуры фланца во время формовки значительно увеличивает упругую отдачу до 3 % и требует создания более совершенного метода горячей штамповки с контролем температуры.

Технологию листовой горячей штамповки можно автоматизировать путем создания системы автоматизированного подбора оптимального выбора метода и оборудования для нагрева для заданных размеров и материала заготовки. Для создания такой САПР требуется исследование процессов [1], происходящих при штамповке, что значительно повысит эффективность штамповки. Промышленное изготовление деталей из листовых материалов имеет большие объемы, соответственно их производство влияет на себестоимость конечного продукта.

Для того, чтобы создать автоматизированную среду для выбора функциональных и проектных схем и расчета параметров нагревательных устройств в горячей листовой штамповке необходимо провести обзор исследований по методам и материалам для горячей штамповки.

Материалы заготовок, условия их штампуемости

Для авто- и авиапромышленности используют высокопрочные листовые металлические материалы, такие как сталь и цветные металлы. Проблемы формуемости листовой автомобильной стали (AHSS) были описаны в статье [3] в связи с получением нового поколения особопрочных материалов для деталей кузова и уменьшением их массы. Структура данных сплавов после горячей штамповки обуславли-

вает высокую прочность, но низкую пластичность. Разрабатывая стали нового поколения Mn-TRIP исследования показали, что необходимо решить вопрос влияния температур на пластичность.

В обзорной статье [4] приведены сверхвысокопрочные борсодержащие сплавы марки стали 22MnB5, как наиболее часто используемые. Однако такие сплавы имеют такой недостаток, как образование окалины при взаимодействии с воздухом при аустенизации. Для его предотвращения используют защитные покрытия, например, металлические или масляные, имеющие также трибологические свойства. Исследования показали важность влияния температуры и скоростей деформации в специально изготовленных деталях на геометрические и механические свойства детали. А именно, что формуемость листового металла при повышенных температурах может быть оценена путем применения соответствующего критерия разрушения, который может быть разработан как функция деформации, скорости деформации, температуры и изменения микроструктуры.

В работах [5, 6] рассмотрены исследования в области горячей штамповки различных металлических листовых сплавов: алюминиевых, магниевых, титановых. Было установлено, что повышение температуры штамповки положительно влияет на качество получаемых изделий. Для улучшения формообразующих характеристик, расширения пределов штамповки, минимизации усилий деформации, требуемой точности детали и их характеристик, штамповка должна проводиться в зависимости от свойств материала и температурного режима, включая нагрев и охлаждение. Однако необходимо более тщательное изучение влияния следующих аспектов: совершенствование конструкции формовочного и нагревательного оборудования, обеспечение и распределение температуры по площади заготовки, трибологические условия.

В статье [7] описана модель для прогнозирования кривых напряжения-деформации при различных температурах и скоростях деформации, позволяющая оптимизировать первоначальную форму заготовки на основе анализа изменения температуры, скорости деформации и траектории нагружения с помощью вязкопластических уравнений в областях разрушения алюминиевого сплава AA7075 в процессе горячей штамповки с применением программ КЭ, Pamstamp и Autoform.

Исследования механической анизотропии алюминиевого сплава АА7В04 описаны в работе [8]. Для характеристики анизотропии алюминиевой пластины АА7В04 пластина была разделена на несколько слоев по направлению толщины. И в каждом слое расчет изгибающего момента производился соответственно на основе критерия текучести фон Мизеса, Хилла 48 и Yld2004-18p. После упругой отдачи была рассчитана кривизна нейтральной поверхности, и профиль нейтральной поверхности был построен методом смешивания поверхностей Безье. Для проверки метода прогнозирования было проведено моделирование методом конечных элементов и эксперимент по изгибу. Результаты показывают, что точность прогнозов этого метода была более точной, чем у модели изотропии.

Работы по моделированию и прогнозированию величины пружинения титанового сплава ОТ4-1 описаны в статье [9]. Разработан математический подход на основе эмпирических данных, позволяющий на этапе проектирования штамповой оснастки и разработки технологического процесса штамповки учесть пружинение заготовки и добиться стабильного получения заданных размеров и формы детали.

В работе [10] описывается проблема точного определения упругой отдачи листового титанового сплава ТА15 в зависимости от температуры и скорости деформации, а также релаксации напряжений во время закалки в штампе. Предполагается, что равномерное нагревание значительно снижает упругую отдачу. Моделирование процесса производится с помощью системы Gleeble.

Методы нагрева

Исследования [11] показали, что технология нагрева заготовки оказывает большое влияние на свойства детали, продолжительность и эффективность горячей штамповки. Равномерная температура и короткое время нагрева являются основными требованиями к нагревательной установке.

В настоящее время в основном используются электроконтактный, индукционный, газовый методы и нагрев в печах. Нагрев в печах в настоящее время считается бесперспективным для усовершенствования, так как имеет множество недостатков, основным является инвестиционные затраты, хотя имеет и технологические проблемы, такие как образование газонасыщенного слоя и значительное время разогрева.

Более привлекательными методами для усовершенствования можно считать электроконтактный [12] и индукционный [13, 14]. При использовании данных методов образуется неравномерность распределения температуры по площади заготовки, обусловленную зонами контакта с электродами при электроконтактном методе и геометрией индуктора при индукционном, что вызывает появление упругой отдачи в готовой детали.

Исследования [13] показали, что процесс индукционного нагрева-штамповки высокопрочных листов из легированной бором стали с заданными температурными режимами может обеспечивать распределение температуры стального листа по площади заготовки в соответствии с различными требованиями к прочности. Достижение повышения прочностных характеристик готового изделия обеспечивает использование магнитных колец в необходимых областях заготовки с коэффициентом разности прочности на разрыв в 3,5 раза и коэффициентом разности удлинения более, чем в 2,2 раза.

В работах [15, 16] было проведено исследование газовой листовой штамповки с односторонним и двусторонним нагревом для листовых заготовок из стали толщиной до 2 мм и из цветных металлов толщиной до 5 мм. Листовая заготовка с одной или двух сторон подвергается воздействию высокотемпературного газа и интенсивно нагревается. Данный метод показывает высокую надежность, но имеет недостаток: необходимо разбирать конструкцию для установки и съема заготовки. Теоретическое расхождение величины температуры заготовки при различных значениях времени нагрева и давления топливной смеси при штамповке с экспериментальными данными составляет около 12...15 %. В настоящее время чаще при газовой листовой штамповке используют электроконтактный или индукционный методы нагрева [17, 18].

Выводы

В данной статье представлен обзор последних исследований в области горячей штамповки, подтверждающий высокую актуальность данной темы. Анализ этих исследований показал, что процесс горячей листовой штамповки в настоящее время широко исследуется у нас и за рубежом, а также выявил необходимость дальнейшего изучения методов нагрева и влияния распределения температур на пластические свойства особопрочных листовых сплавов.

Проведенные исследования показали, как получить высокую точность формы горячештампованных деталей с минимальным пружинением. Однако, в связи с отсутствием общих основ решения данной проблемы – изготовление деталей с заданными свойствами – необходимо провести дополнительные исследования, направленные на изучение влияния различных процедур фазового преобразования на геометрические и механические свойства детали.

Кроме того, на основе полученных данных, появляется возможность создания САПР, основным назначением которой является выбор физического принципа действия для нагрева излучением, конструктивной схемы нагревательной установки, а также определение оптимальных конструктивных решений и режимов работы в зависимости от параметров заготовок, условий технологического процесса нагрева и дальнейших действий с заготовкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sajan, M., Amirthalingam, M., Chakkingal U.* A novel method for the spring-back analysis of a hot stamping steel // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 11. – Pp. 227-234.
2. *Nakagawa, Y., Mori, Ki. & Maeno, T.* Springback-free mechanism in hot stamping of ultra-high-strength steel parts and deformation behaviour and quenchability for thin sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. – Vol. 95. – Pp. 459-467.
3. *Yi, H. L., Sun, L., Xiong, X. C.* Challenges in the formability of the next generation of automotive steel. *Materials Science and Technology // Materials science and technology*, 2018. – Vol. 34. – N 9. – Pp. 1112-1117.
4. *Karbasian, H., Tekkaya, A.E.* A review on hot stamping // *Journal of Materials Processing Technology*, 2010. – Vol. 210. – Is. 15. – Pp. 2103-2118.
5. *Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M., Sterzing, A.* Sheet metal forming at elevated temperatures // *CIRP Annals*, 2006. – Vol. 55. – Is.2. – Pp. 793-816.
6. *Doege E., Kurz G., Doege E.* Development of a formulation to describe the work softening behaviour of magnesium sheets for heated deep drawing processes // *CIRP Annals*, 2001. – Vol.50. – Is.1. – Pp.177-180.
7. *Zhu M., Lim Yi. C., Liu Xi., Cai Zh., Dhawan S., Gao H., Politis D. J.* Numerical forming limit prediction for the optimisation of initial blank shape in hot stamping of AA7075 // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2021. – Vol.4. – Is.3. – Pp. 269-280.
8. *Liu C., Li M., Yue T.* Springback prediction method for double-curved workpiece considering plate anisotropy in multi-point forming // *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021. – Vol. 35. – Is.6. – Pp. 2623 – 2636.
9. Разработка математической модели профилирования пуансона и матрицы для гибки листовых титановых сплавов / Ц. А. Батуев, А. Д. Грешилов, Ю. Л. Шурыгин, Э. Ц. Галсанова // *Материалы VII Международной научной конференции «Проблемы механики современных машин»*, 25 – 30 июня 2018. – Т.3. – 20–24 стр.
10. *Lechler, J.* Grundlegende Untersuchungen zur Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärzbaren Bor-Manganstählen. Dr.-Ing. Dissertation, LFT, University of Erlangen-Nuremberg. – 2009.
11. *Chen, Y., Han, G., Li, Y., Li, Z., Lin, Z.* Time-dependent springback prediction with stress relaxation effect for non-isothermal hot stamping of titanium alloy sheets // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021. – Vol.115. – Is.1-2. – Pp. 637-653.
12. *Kocar O, Livatyali H.* Investigation on the mechanical properties of press-hardened boron steel sheets using the conductive heating technique // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2020. – N234(8). – Pp.1084–1098.
13. *Bao Li, Liu W.J., Wang Bo, Li H., You X., Zhou Q., Liu M., Gao Sh.* Experimental investigation on partition controllable induction heating-hot stamping process of high-strength boron alloyed steel plates with designable temperature patterns // *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. – Vol.9. – Is.6. – Pp. 13963-13976.
14. *Mori K., Maki S., Tanaka Y.* Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating // *CIRP Annals*, 2005. – Vol.54. – Is.1. – Pp. 209-212.
15. *Боташев, А. Ю.* Экспериментальные исследования газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2014. №1. – С. 17-19.
16. *Боташев, А. Ю.* Разработка и исследование устройства для газовой штамповки с односторонним нагревом заготовки / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов, Р. С. Малсугенов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014. – № 7. – С. 28–33.
17. Пат. 878392 РФ, МПК B21D 26/12. Устройство для импульсной листовой штамповки с нагревом заготовок / Чачин В. Н., Сманцер А. Г., Бачурин Ю. Д., Рубан А. П. ; заявитель и патентообладатель Физико-технический университет Белорусской ССР. – № 2879893/27, заявл. 04.02.1980.; опубл. 20.12.2013 Бюл. № 35.
18. *Falaleev, A.P., Meshkov, V.V., Vetrogon, A.A., Shymchenko, A.V.* Evolution of mechanical properties of boron/manganese 22MnB5 steel under magnetic pulse influences // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016. – Vol. 110(1) – Is. 1. – N.012107.