

А. В. Малолетов^{1,2}, Т. Р. Сатдаров¹

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХСТОРОННЕЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ
ИНКРЕМЕНТАЛЬНОЙ ФОРМОВКИ***

¹ Университет Иннополис

² Волгоградский государственный технический университет

a.maloletov@innopolis.ru

Задача инкрементальной формовки рассматривается как задача создания в материале заготовки локальных напряжений, соответствующих пределу текучести для этого материала, и последующему перемещению инструмента, обеспечивающему деформацию материала в требуемом направлении. В статье описывается моделирование напряжений, возникающих при односторонней и двухсторонней инкрементальной формовке. Компьютерная модель включает в себя заготовку и один или два стержня. Стержни в процессе моделирования перемещаются вдоль своих осей, создавая давление на материал заготовки, а также по траектории, которая обеспечивает придание заготовке нужной формы. Расчет напряжений и деформаций выполнялся на основе метода конечных элементов. Показано уменьшение необходимого перемещения инструмента и уменьшение зоны пластической деформации по сравнению с односторонней формовкой. Оба этих фактора способствуют улучшению точности формируемой детали.

Ключевые слова: робот, инкрементальная формовка, математическое моделирование, расчет напряжений в материале.

© Малолетов А. В., Сатдаров Т. Р., 2024.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-41-02006.

A. V. Maloletov^{1, 2}, T. R. Satdarov¹

MODELING OF DOUBLE-SIDED ROBOTIZED INCREMENTAL FORMING

¹ Innopolis University

² Volgograd State Technical University

The problem of incremental forming is considered as a problem of creating local stresses in the workpiece material corresponding to the yield strength for this material and the subsequent movement of the tool that provides deformation of the material in the required direction. The paper describes the modeling of the stresses arising from single-sided and double-sided incremental forming. The computer model includes a workpiece and one or two rods. The rods move along their axes during the modeling process, creating pressure on the workpiece material, as well as along a trajectory that ensures that the workpiece is given the desired shape. Stresses and deformations were calculated using the finite element method. It is shown that the required tool displacement is reduced and the plastic deformation zone is smaller than in the case of one-sided molding. Both of these factors contribute to improving the accuracy of the formed part.

Keywords: robot, incremental sheet forming, mathematical modeling, calculation of stresses in the material.

Введение

Традиционными способами изготовления сложных форм из листового металла являются холодная штамповка и гибка. Преимущества данных способов заключаются в небольших затратах времени для производства отдельных деталей и высокой точности их изготовления. Основные недостатки – это значительные ограничения на геометрию изготавливаемых форм, особенно для гибочного производства, а также высокая стоимость и сложность подготовительных работ, чаще всего для штамповки, требующей изготовления соответствующих штампов.

В последние годы активно развивается технология инкрементальной формовки листового металла [1, 2] (рис. 1). Инкрементальная формовка (в англоязычной литературе – incremental

sheet forming, ISF) – это технологический процесс изготовления сложных трехмерных форм из листового металла путем постепенной деформации материала в серии относительно небольших движений универсального инструмента, в качестве которого как правило используется стержень с концом сферической формы с высокими значениями жесткости и износостойкости. Для реализации этого технологического процесса изготавливаются специализированные станки, обеспечивающие перемещение инструмента по трем координатам, а также при необходимости – синхронное перемещение зажимов таким образом, чтобы нижняя обрабатываемая часть заготовки лежала на подложке из упругого материала, обеспечивающего противодействие усилию со стороны инструмента.

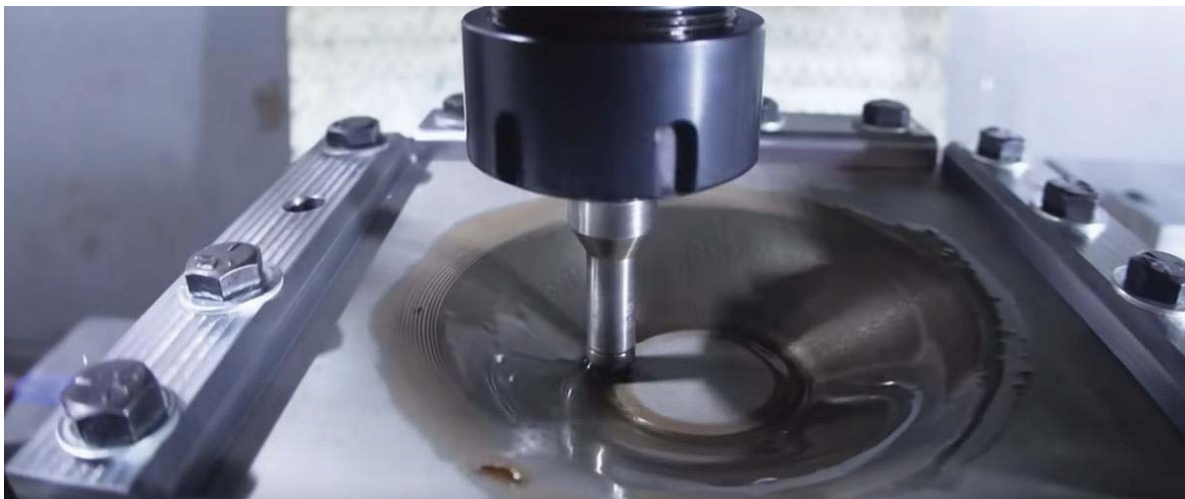


Рис. 1. Процесс инкрементальной формовки

В то же время в связи с повсеместной роботизацией промышленного производства, доступностью все более мощных промышленных роботов и запросом на кастомизацию произво-

димой продукции развивается технология роботизированной инкрементальной формовки, в которой в качестве оборудования используется универсальный промышленный робот-мани-

пулятор. По сравнению со специализированным станком робот-манипулятор обладает существенно меньшей жесткостью, что требуется учитывать и компенсировать при планировании движения робота для реализации необходимой формы изготавливаемой детали [3, 4]. Как правило, в этом случае заготовка жестко закрепляется по краям, но упругие деформации в центральной части листа остаются значительными и, в свою очередь, требуют учета при планировании пути робота. Достоинствами применения промышленных роботов-манипуляторов являются меньшая стоимость по сравнению со станком и их большая универсальность. В частности, шестистепенный манипулятор потенциально позволяет деформировать поверх-

ность листа под углами, превышающими 90 градусов к его первоначальной плоскости.

Моделирование процесса инкрементальной формовки

Задача инкрементальной формовки сводится к созданию в материале заготовки локальных напряжений, соответствующих пределу текучести для этого материала, и последующему перемещению инструмента, обеспечивающему деформацию материала в требуемом направлении. Компьютерная модель включает в себя заготовку и один или два стержня (рис. 2). В качестве материала заготовки выбран алюминий 6061-Т6, материал стержней – сталь 45. Размеры заготовки – 500х500х2 мм; заготовка жестко

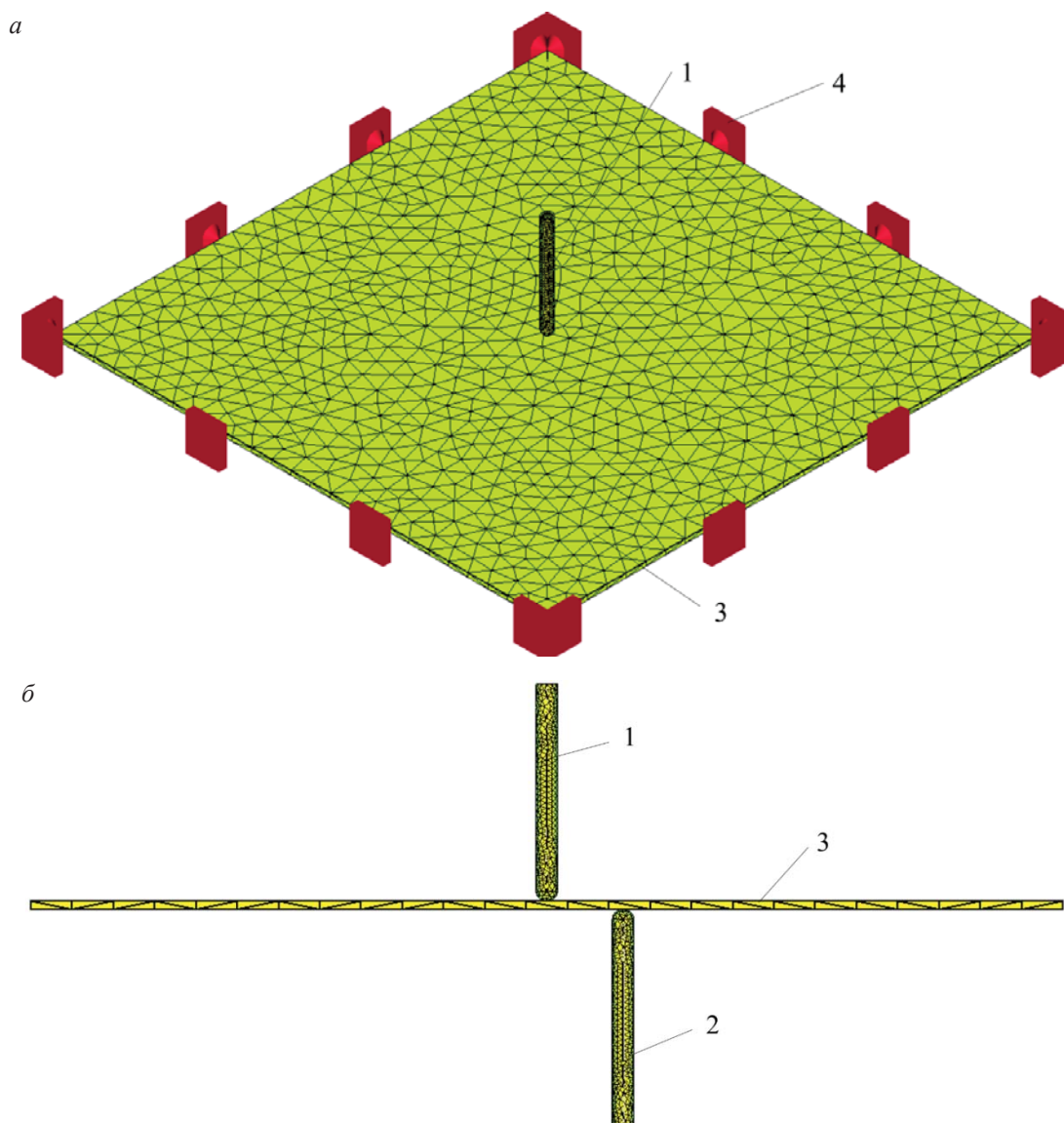


Рис. 2. Компьютерная модель:

a – вид в аксонометрической проекции; *б* – вид сбоку; 1 – деформирующий стержень; 2 – поддерживающий стержень; 3 – заготовка; 4 – условное обозначение защемления заготовки

защемлена по периметру. Рабочая поверхность стержня – полусфера радиусом 5 мм. Стержни в процессе моделирования перемещаются вдоль своих осей, создавая давление на материал заготовки, а также по траектории, которая обеспечивает придание заготовке нужной формы. Расчет напряжений и деформаций выполняется на основе метода конечных элементов.

В качестве критерия наступления пластической деформации используется напряжение по Мизесу. Поскольку материал заготовки – алюминий – относится к металлам, в диаграмме напряжений и деформаций которых нет явно выраженной площадки текучести, значение напряжения по Мизесу сравнивается с условным пределом текучести $\varepsilon_{0,2}$. Согласно справочным данным условный предел текучести алюминия может принимать значения в широком диапазоне в зависимости от механического состояния материала – наличия и величины предварительной деформации. Этот фактор должен приниматься во внимание при формировании поверхностей сложной формы, требующих деформации ранее уже деформированного слоя материала, но для текущего моделирования считается, что деформации подвергается каждый раз новый участок поверхности, ранее не деформированный, и принимается минимальное значение условного предела текучести, равное 50 МПа.

На рис. 3, а показан пример моделирования: напряжения по Мизесу при воздействии на за-

готовку одним стержнем. Перемещение стержня составляет 1 мм и подобрано таким образом, чтобы обеспечить напряжения в заготовке ниже условного предела текучести; исходя из этого, остаточная деформация остается близкой к нулю. В этом и последующих рисунках не следует обращать внимание на напряжения, возникающие в стержне. Стержень выполнен из стали и способен выдерживать достаточно большие нагрузки.

Для сравнения на рис. 3, б представлен пример моделирования при пластических деформациях заготовки. В этом случае осевое перемещение стержня составляет 2 мм, а прочие параметры системы оставлены без изменений. Хорошо видно, что напряжения превышают условный предел текучести по всей толщине материала, что означает пластическую деформацию заготовки.

Напряжение, возникающее в материале заготовки, зависит не только от перемещения стержня в осевом направлении, но и от положения стержня относительно зафиксированных концов заготовки. В зависимости от положения стержня, а также размеров заготовки, пластические деформации реализуются при различных перемещениях стержня. Поэтому планирование движения робота должно основываться на результатах моделирования и учитывать поправки на осевое перемещение инструмента, которые обеспечивают пластическую деформацию в каждом конкретном случае.

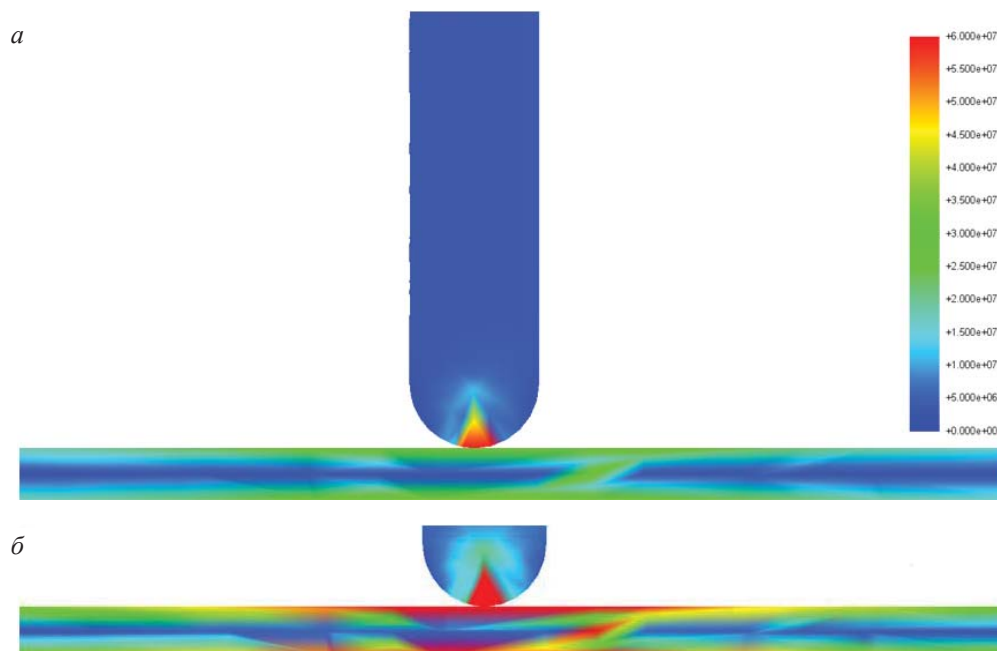


Рис. 3. Напряжения по Мизесу в зоне контакта при односточечной формовке:
а – в случае упругих деформаций; б – в случае пластических деформаций

Использование двух стержней, деформирующего и поддерживающего, позволяет сделать процесс более управляемым за счет того, что в этом случае возникающие нагрузки в меньшей степени зависят от положения обрабатываемого участка относительно креплений заготовки, а в большей степени – от взаимного расположения стержней. На рис. 4 представлен пример моделирования при использовании двух стержней. При этом правый (нижний) стержень является поддерживающим, то есть он не перемещается в осевом направлении. А левый (верхний) стержень является деформирующим, то есть его осе-

вое перемещение формирует необходимую деформацию заготовки. На рисунке хорошо видно возникновение двух зон пластической деформации в окрестностях точек контакта стержней с заготовкой. Перемещение деформирующего стержня в представленном примере равно 0,7 мм. Таким образом, удастся значительно уменьшить перемещение инструмента: в приведенных примерах перемещение стержня, обеспечивающее пластическую деформацию заготовки, уменьшилось примерно в три раза. Также уменьшается зона высоких напряжений, позволяя более точно локализовать деформации.

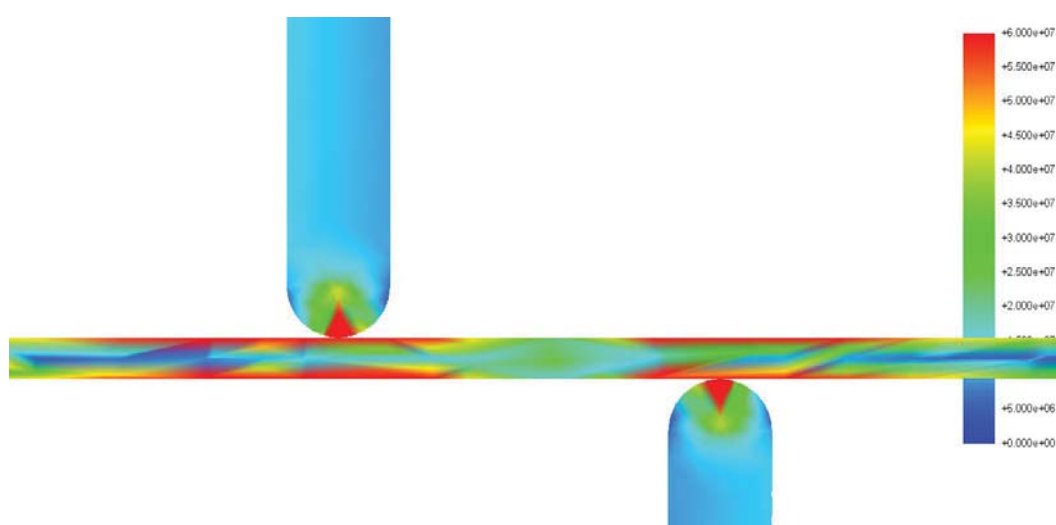


Рис. 4. Напряжения по Мизесу в зоне контакта при двухсторонней формовке

Выводы

Двухсторонняя роботизированная формовка с использованием двух однотипных инструментов представляется более целесообразной по сравнению с альтернативным способом создания противодействия инструменту с применением соответствующих приспособлений, в качестве которых можно использовать упоры соответствующей формы, накладные пластины или зажимы с губками соответствующего профиля. Использование приспособлений лишает метод роботизированной инкрементальной формовки его основного преимущества – возможности изготавливать произвольные формы без необходимости изготовления формовочных инструментов для каждого отдельного вида деталей. Поэтому более эффективным представляется использование роботизированного комплекса, состоящего из двух промышленных роботов, реализующих двухстороннюю формовку. В этом случае один из роботов обеспе-

чивает формирование материала, а второй реализует поддержку соответствующего участка материала. Одним из преимуществ такого подхода является более точная локализация зоны пластической деформации материала, а следовательно – меньшие радиусы закругления при переходе с одной поверхности на другую.

Еще одним преимуществом двухсторонней роботизированной формовки является возможность изготавливать выпуклые формы с разнонаправленной относительно листа металла кривизной.

В настоящем исследовании произведено моделирование напряжений, возникающих при односторонней и двухсторонней инкрементальной формовке. Показано уменьшение необходимого перемещения инструмента и уменьшение зоны пластической деформации по сравнению с односторонней формовкой. Оба этих фактора способствуют улучшению точности формируемой детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Park, J.-J.* Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique / J.-J. Park, Y.-H. Kim // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140. – No. 1–3. – Pp. 447–453.
2. *Bahloul, R.* A study on optimal design of process parameters in single point incremental forming of sheet metal by combining box-behnken design of experiments, response surface methods and genetic algorithms / R. Bahloul, H. Arfa, H. BelHadjSalah // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74. – No. 1. – Pp. 163–185.
3. *Smith, J.* Deformation mechanics in single-point and accumulative double-sided incremental forming / J. Smith, R. Malhotra, W. Liu, J. Cao // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 69. – No. 5. – Pp. 1185–1201.
4. *Shaker, W. K.* Stiffness-based Offline Toolpath Error Compensation for Robotized Incremental Forming / W. K. Shaker, A. Klimchik // 2023 7th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR), Kuala Lumpur, Malaysia, 2023. – Pp. 48–53.
5. *Al-Ghamdi, K.* The pillowing tendency of materials in single-point incremental forming: experimental and finite element analyses / K. Al-Ghamdi, G. Hussain // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture. – 2015. – Vol. 229. – No. 5. – Pp. 744–753.