

УДК 621

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ РОЛИКОВОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ

Сафина Д. А.¹, студентка гр. МТа-251, I курс, Иванищев С. Е.², студент гр. МТа-251 I курс

Научный руководитель: Кречетов А. А.¹, к.т.н.,

¹Кузбасский государственный технический университет
Имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово

В современном машиностроении широкое применение получили изделия, изготавливаемые методами роликового формообразования листовых заготовок. Данный метод используется при производстве осесимметричных деталей с полым круглым поперечным сечением, таких как цилиндрические и конические оболочки, сферические, торосферические и эллиптические днища, купола, корпуса и другие тонкостенные конструкции [1].

При формообразовании листовых материалов, в том числе при гибке и холодном фланжировании роликами, одной из основных проблем является возникновение дефектов, прежде всего трещин на внешней поверхности заготовки. Появление таких дефектов связано с нерациональным выбором технологических режимов обработки и приводит к снижению качества изделий, их браку и увеличению производственных затрат.

В работе рассматриваются подходы к оценке результатов роликового формообразования листовых деталей с точки зрения влияния технологических режимов на накопление деформации и поврежденности материала.

В настоящее время существует значительное количество работ, посвященных выбору технологических режимов роликового формообразования. В них параметры процесса, такие как усилие деформирования, подача, геометрия инструмента и количество проходов, назначаются на основе эмпирических зависимостей, связывающих условия обработки с геометрией получаемой детали и характером формоизменения материала.

Показано, что увеличение формующей силы приводит к росту степени деформации, однако сопровождается увеличением утонения стенки заготовки. Повышение подачи ролика также способствует интенсификации пластической деформации и росту напряжений, но при чрезмерных значениях приводит к неравномерности деформации и повышению вероятности разрушения материала. Существенное влияние оказывает геометрия инструмента: уменьшение радиуса формующего ролика увеличивает степень утонения, тогда как применение роликов с большим радиусом скругления способствует более равномерному распределению толщины [1-5].

Несмотря на наличие подобных зависимостей, их применение ограничено, поскольку они не учитывают изменение напряжённо-деформированного

состояния материала в процессе последовательных проходов и влияние предшествующих стадий обработки. В результате использование эмпирических подходов не позволяет надежно прогнозировать накопление поврежденности материала и момент возникновения разрушения.

В работах рассматривающих напряженно-деформированное состояние материала при роликовом формообразовании показано, что процесс характеризуется выраженной локализацией пластической деформации в зоне контакта инструмента с заготовкой и существенной неоднородностью распределения деформаций по толщине и длине образующей. В процессе деформирования материал испытывает комбинированное нагружение, включающее изгиб, растяжение и сдвиг, обусловленное кинематикой движения ролика и геометрией очага деформации.

Наибольшие значения деформаций сосредоточены в приповерхностных слоях, непосредственно контактирующих с инструментом, тогда как в удалённых зонах их уровень существенно ниже. При этом наружные слои заготовки преимущественно испытывают растяжение, а внутренние — сжатие, что приводит к формированию градиентного напряженно-деформированного состояния и определяет изменение толщины стенки изделия [3-6].

Однако существующие подходы, основанные на анализе НДС, как правило, рассматривают отдельные стадии деформирования и не учитывают накопительный характер изменения состояния материала.

В связи с этим в работе ставится задача разработки подхода к оценке результатов роликового формообразования, основанного на анализе накопления деформации и поврежденности материала с учетом предыстории нагружения.

Для решения данной задачи предлагается адаптация аппарата механики технологического наследования, позволяющего рассматривать процесс формообразования как последовательность стадий нагружения и учитывать эволюцию напряженно-деформированного состояния материала [7-10].

В соответствии с основными положениями механики технологического наследования в материальных частицах материала рассматривается накопление пластической деформации и поврежденности при их движении вдоль линий тока – траекторий перемещения материальных частиц относительно инструмента в очаге деформации. При достижении критического уровня накопленной поврежденности возникает разрушение, проявляющееся в виде трещин.

В качестве параметра, характеризующего накопленную поврежденность материала, используется степень исчерпания запаса пластичности Ψ . Критерием разрушения принимается условие:

- $\Psi < 1$ — материал сохраняет целостность;
- $\Psi \geq 1$ — происходит разрушение.

С учётом технологического наследования суммарная поврежденность материала определяется как сумма поврежденности, накопленной на предыдущих стадиях обработки, и поврежденности, возникающей на текущей стадии:
 $\Psi = \Psi_0 + \Psi_1,$

где Ψ_0 — поврежденность, накопленная на предыдущих стадиях, Ψ_1 — поврежденность, формирующаяся в процессе рассматриваемой операции.

Определение параметров напряжённо-деформированного состояния может быть выполнено с использованием численных методов, например метода конечных элементов, что позволяет учитывать изменение геометрии заготовки, локальный характер деформации и сложное распределение напряжений по толщине материала.

Предложенный подход позволяет оценивать влияние технологических режимов (усилия деформирования, подачи, геометрии инструмента) на накопление поврежденности материала и определять условия обработки, при которых обеспечивается выполнение критерия $\Psi < 1$, исключающего образование трещин.

Заключение: в работе рассмотрены существующие подходы к назначению технологических режимов роликового формообразования листовых деталей и показаны ограничения эмпирических зависимостей, применяемых при их выборе. Установлено, что такие подходы не обеспечивают учёт накопления деформации и поврежденности материала, а также влияние предшествующих стадий обработки.

Предложен подход к оценке результатов формообразования, основанный на анализе напряжённо-деформированного состояния материала с использованием аппарата механики технологического наследования. Показано, что рассмотрение процесса как последовательности стадий нагружения позволяет учитывать предысторию деформирования и оценивать накопление поврежденности материала.

Введен критерий оценки работоспособности технологического режима, основанный на степени исчерпания запаса пластичности Ψ , что позволяет определять условия обработки, при которых обеспечивается целостность материала и исключается образование трещин.

Полученные результаты создают основу для более обоснованного выбора технологических режимов роликового формообразования и повышения качества изготавливаемых изделий.

Список литературы:

1. A Review of Process Advancement of Novel Metal Spinning / Qinxiang Xia, Gangfeng Xiao, Hui Long, Xiuquan Cheng, Xiangfei Sheng // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2014. — Vol. 85. — pp. 100-121. — DIO 10.1016/j.ijmachtools.2014.05.005.
2. The influence of part asymmetry on the achievable forming height in multipass spinning / Iacopo M. Russo, Christopher J. Cleaver, Julian M. Allwooda, Evripides G. Loukaides // Journal of Materials Processing Tech. — 2020. — Vol. 275 — pp. 116350.1-116350.16 — DIO 10.1016/j.jmatprotec.2019.116350.

3. Raising by spinning / Iacopo M. Russo, Christopher J. Cleaver, Evripides G. Loukaides, Julian M. Allwood // CIRP Annals- Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 69 – pp. 277-280. – DIO 10.1016/j.cirp.2020.04.073.
4. Research on the deformation behavior and microstructure characteristics of 2024 aluminum alloy spun parts in die-less spinning process using ball-crown-shape rollers / Yongping Shen, Yijie Chen, Zhen Jia, Guangrui Wang // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2026. – Vol. 64. – pp. 171-186 – DIO 10.1016/j.cirpj.2025.12.009.
5. Wang, Lin Analysis of Material Deformation and Wrinkling Failure in Conventional Metal Spinning Process. – 2012. – Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/3537/>
6. Computer Aided Engineering in the application of rotational forming of axially asymmetric geometries / Majewski Marcina, Gadek Tomasz, Klimek Leszek, Januszewicz Bartłomiej, Sułek Bartosz // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 115 – pp. 275-288. – DIO 10.1016/j.jmapro.2024.02.031.
7. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с. УДК 621.771 (075.8).
8. Колмогоров, Вадим Леонидович. Напряжения. Деформации. Разрушение [Текст]. — [Москва] : [Металлургия], [1970]. — 230 с. : ил. : 22 см. УДК 669.539.37/38.
9. Богатов А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. — М. : Металлургия, 1984. — 144 с. ил.; 21. см.
10. Джонсон, Уэйн. Теория пластичности для инженеров [Текст] / Перевод с англ. А.Г. Овчинникова. — Москва : Машиностроение, 1979. — 567 с. : ил. : 22 см. УДК 621.7.011 : 539.214-20-03.82.