

ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА КАЧЕСТВО ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКЕ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20003296>

Загидуллин Рафаил Рахимуллаевич

*доцент. Ташкентского государственного технического университета имени
Ислама Каримова*

Рахимов Дониёр Равшан угли

*магистрант 1 курса Ташкентского государственного технического
университета имени Ислама Каримова по направлению "Технология металлов"
группы 61М-25МТ*

Аннотация

В статье рассматривается влияние методов искусственного интеллекта на качество продукции при холодной штамповке. Описаны основные направления применения ИИ, включая контроль качества, прогнозирование параметров и оптимизацию технологических режимов. Показано, что использование интеллектуальных систем позволяет повысить точность обработки, снизить уровень брака и обеспечить стабильность производственного процесса.

Ключевые слова

холодная штамповка, искусственный интеллект, качество продукции, оптимизация, нейронные сети, машинное обучение, дефекты, контроль качества, моделирование, адаптивное управление, цифровое производство, предиктивное обслуживание

Abstract

The article examines the impact of artificial intelligence methods on product quality in cold stamping processes. The main directions of AI application are described, including quality control, parameter prediction, and process optimization. It is shown that intelligent systems improve accuracy, reduce defects, and enhance production stability.

Keywords

cold stamping, artificial intelligence, product quality, optimization, neural networks, machine learning, defects, quality control, modeling, adaptive control, digital manufacturing, predictive maintenance

Annotatsiya

Maqolada sun'iy intellekt usullarining sovuq shtamplash jarayonida mahsulot sifati parametrlariga ta'siri ko'rib chiqiladi. Sifat nazorati, parametrlarni bashoratlash va texnologik rejimlarni optimallashtirish kabi asosiy yo'nalishlar yoritilgan. Intellektual tizimlar aniqlikni oshirishi, nuqsonlarni kamaytirishi va ishlab chiqarish barqarorligini ta'minlashi ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar

sovuq shtamplash, sun'iy intellekt, mahsulot sifati, optimallashtirish, neyron tarmoqlar, mashinaviy o'rganish, nuqsonlar, sifat nazorati, modellashtirish, adaptiv boshqaruv, raqamli ishlab chiqarish, prediktiv xizmat

Современные технологии искусственного интеллекта (ИИ) все активнее внедряются в различные отрасли промышленности, включая машиностроение и производство осесимметричных деталей. Эти детали, широко используемые в автомобильной, авиационной и машиностроительной промышленности требуют высокой точности и качества параметров для обеспечения надежности и эффективности работы конечных изделий. Внедрение ИИ позволяет оптимизировать процессы проектирования, контроля качества и производства, что способствует значительному улучшению характеристик таких компонентов.

Использование методов машинного обучения и анализа больших данных открывает новые возможности для предсказания дефектов, автоматизации измерений и адаптивного управления технологическими процессами. Благодаря этому повышается стабильность размеров, формы и других критически важных параметров осесимметричных деталей. В статье рассматриваются ключевые направления применения ИИ в производстве этих компонентов, а также анализируется влияние современных алгоритмов на качество продукции и снижение издержек производителя.

Искусственный интеллект играет ключевую роль в трансформации современных процессов холодной штамповки, обеспечивая качественно новый уровень автоматизации, точности и эффективности производства. Холодная штамповка широко применяется в машиностроении, автомобильной, авиационной и других отраслях промышленности, где предъявляются высокие требования к геометрической точности, прочностным характеристикам и надежности изделий.

Традиционные методы штамповки и контроля качества, основанные на инженерных расчетах и экспериментальном подборе режимов, имеют ряд ограничений, связанных с высокой трудоемкостью, зависимостью от человеческого фактора и сложностью анализа многопараметрических процессов. В условиях цифровизации производства и перехода к концепции «Индустрия 4.0» возникает необходимость внедрения интеллектуальных систем, способных анализировать большие объемы данных, выявлять закономерности и принимать оптимальные решения в реальном времени.



Рис. 1. Традиционные методы производства против ИИ в процессах холодной штамповки

Одним из ключевых направлений применения ИИ является анализ технологических параметров холодной штамповки, таких как усилие деформации, скорость штамповки, температура материала и условия трения. С использованием методов машинного обучения возможно построение моделей, позволяющих прогнозировать поведение металла и конечные параметры изделия. Это особенно важно, поскольку малейшие отклонения параметров процесса могут привести к дефектам, таким как трещины, складки или неравномерное распределение напряжений.

Особое значение имеют нейронные сети, которые способны моделировать сложные нелинейные зависимости между параметрами процесса и качественными характеристиками изделий. Сверточные

нейронные сети (СНС) применяются для анализа изображений поверхности изделий и выявления дефектов, таких как микротрещины, задиры и неровности. Рекуррентные нейронные сети (РНС) используются для обработки временных рядов данных, поступающих с датчиков оборудования, что позволяет отслеживать динамику изменения параметров процесса и своевременно выявлять отклонения.

ИИ также широко применяется для автоматизации контроля качества в процессах холодной штамповки. Современные системы компьютерного зрения позволяют проводить бесконтактный анализ поверхности изделий с высокой точностью и скоростью. Такие системы способны обнаруживать дефекты, которые трудно выявить традиционными методами, а также обеспечивают объективность и повторяемость результатов измерений.

Важным аспектом является применение ИИ в системах адаптивного управления технологическими процессами. На основе данных, получаемых в режиме реального времени, интеллектуальные системы способны автоматически корректировать параметры штамповки, такие как усилие, скорость и режимы обработки, обеспечивая оптимальные условия формирования изделия. Это позволяет минимизировать вероятность возникновения дефектов, снизить износ штамповой оснастки и повысить стабильность производственного процесса.

Дополнительным преимуществом использования ИИ является возможность реализации предиктивного обслуживания оборудования. Анализ данных о состоянии прессового оборудования и штампов позволяет прогнозировать их износ и своевременно проводить техническое обслуживание, предотвращая аварийные ситуации и снижая простои производства.

В перспективе развитие искусственного интеллекта в холодной штамповке связано с интеграцией технологий цифровых двойников и промышленного интернета вещей (IIoT). Это позволит создавать виртуальные модели технологических процессов, проводить их оптимизацию и тестирование без необходимости выполнения дорогостоящих экспериментов. Такие решения обеспечат более глубокое понимание процессов деформации металла и повысят эффективность управления производством.

Таким образом, искусственный интеллект становится неотъемлемым элементом современных процессов холодной штамповки, обеспечивая повышение качества продукции, снижение производственных затрат и рост конкурентоспособности предприятий. Его внедрение открывает новые

возможности для развития высокотехнологичных производств и перехода к полностью автоматизированным и интеллектуальным системам управления.

Качество изделий, получаемых методом холодной штамповки, является одним из ключевых факторов, определяющих надежность, долговечность и эксплуатационные характеристики машин и механизмов. В современных условиях производства к таким изделиям предъявляются высокие требования по точности геометрических параметров, состоянию поверхности и механическим свойствам материала. В связи с этим особое значение приобретает комплексная оценка качества продукции на всех этапах технологического процесса.



Рис. 2. Проверка качества поверхности листовой штамповки

Одним из важнейших показателей качества является геометрическая точность, которая характеризует соответствие формы и размеров изделия заданным параметрам. В процессе холодной штамповки могут возникать различные отклонения формы, такие как неравномерность толщины, искривления, локальные деформации и отклонения профиля. Для оценки геометрической точности применяются координатно-измерительные машины, оптические и лазерные сканеры, а также индикаторные измерительные приборы. Обеспечение высокой точности геометрии особенно важно, поскольку даже незначительные отклонения могут привести к снижению качества сборки и ухудшению эксплуатационных характеристик изделий.

Не менее значимым параметром является шероховатость поверхности, которая оказывает прямое влияние на износостойкость, трение и усталостную прочность деталей. В процессе холодной штамповки состояние поверхности формируется под воздействием давления, трения и состояния инструмента. Шероховатость оценивается с помощью контактных профилометров, оптических измерительных систем и интерференционных методов. Снижение шероховатости способствует увеличению срока службы изделий и улучшению их эксплуатационных характеристик.

К числу основных параметров качества также относятся размерные отклонения, которые определяют соответствие фактических размеров изделия установленным допускам. В процессе штамповки отклонения могут возникать из-за неточности инструмента, неравномерности деформации и нестабильности технологических режимов. Контроль размеров осуществляется с использованием микрометров, калибров, штангенциркулей и современных лазерных измерительных систем. Точная оценка размеров необходима для обеспечения взаимозаменяемости изделий и их корректной работы в составе сборочных единиц.

Важным фактором, влияющим на качество изделий, являются остаточные напряжения, возникающие в процессе пластической деформации. Их наличие может приводить к последующим деформациям, снижению прочности и появлению трещин в процессе эксплуатации. Для оценки остаточных напряжений применяются методы рентгеноструктурного анализа, сверления отверстий и ультразвукового контроля. Контроль этих параметров особенно важен для изделий, работающих в условиях переменных нагрузок и повышенных требований к надежности.

Кроме того, существенное значение имеют микротвердость и структура материала, которые определяют механические свойства изделий, такие как прочность, пластичность и устойчивость к износу. Изменения структуры могут возникать вследствие нарушения технологических режимов штамповки или неоднородности исходного материала. Оценка данных параметров проводится с использованием микротвердомеров, металлографического анализа и методов электронной микроскопии.

В последние годы для повышения точности и эффективности контроля качества в процессах холодной штамповки активно внедряются технологии искусственного интеллекта. Современные интеллектуальные системы позволяют автоматически анализировать изображения поверхности изделий, выявлять дефекты, такие как трещины, складки и задиры, прогнозировать

отклонения параметров и осуществлять контроль в режиме реального времени. Методы компьютерного зрения и машинного обучения обеспечивают высокую точность измерений, повышают скорость обработки данных и минимизируют влияние человеческого фактора.

Современный подход к оценке качества изделий основан на комплексном анализе всех параметров с использованием интегрированных систем контроля. Такие системы объединяют данные, поступающие с различных измерительных устройств, и позволяют проводить многокритериальный анализ, формируя объективное заключение о качестве продукции. Это особенно важно в условиях массового производства, где требуется высокая скорость и точность контроля.

Таким образом, качество изделий, получаемых методом холодной штамповки, определяется совокупностью геометрических, механических и эксплуатационных параметров. Применение современных методов оценки, включая технологии искусственного интеллекта, позволяет существенно повысить точность контроля, снизить уровень брака и обеспечить стабильность технологических процессов. Интеграция традиционных и интеллектуальных методов контроля является важнейшим направлением развития современного машиностроительного производства.

Современное развитие машиностроительного производства сопровождается постоянным ростом требований к качеству и точности изделий, получаемых методом холодной штамповки, что обуславливает необходимость внедрения интеллектуальных методов управления технологическими процессами. Алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) играют ключевую роль в автоматизации контроля и оптимизации параметров штамповки, обеспечивая повышение стабильности, точности и эффективности производства.

Традиционные методы контроля качества в процессах холодной штамповки основаны на использовании контактных и бесконтактных измерительных средств, однако они имеют ряд ограничений, связанных с низкой скоростью обработки информации, зависимостью от квалификации оператора и сложностью анализа многопараметрических процессов. В этих условиях применение алгоритмов ИИ позволяет существенно повысить эффективность контроля за счет автоматизированной обработки больших массивов данных, поступающих с датчиков и систем компьютерного зрения. Современные интеллектуальные системы способны анализировать изображения поверхности изделий, выявлять дефекты, такие как трещины,

складки и задиры, а также обнаруживать отклонения параметров, которые трудно зафиксировать традиционными методами. Это обеспечивает значительное повышение точности и надежности контроля качества.

Одним из важнейших направлений применения искусственного интеллекта является прогнозирование технологических параметров и вероятности возникновения дефектов. Алгоритмы машинного обучения обучаются на основе исторических данных, включающих параметры процесса холодной штамповки, такие как усилие деформации, скорость штамповки, температура материала и условия трения, а также результаты обработки, характеризующие качество изделий. На основе анализа этих данных модели способны прогнозировать отклонения размеров, оценивать вероятность появления дефектов и определять оптимальные режимы обработки. Это позволяет заранее корректировать технологические параметры и предотвращать образование брака, что существенно повышает эффективность производства.

Оптимизация параметров холодной штамповки является сложной многокритериальной задачей, требующей учета большого количества факторов. В этой области активно применяются методы машинного обучения, нейронные сети, генетические алгоритмы, алгоритмы роя частиц и методы обучения с подкреплением. Использование данных подходов позволяет находить оптимальные сочетания технологических параметров, обеспечивающие высокое качество изделий при минимальных затратах ресурсов. Нейронные сети, в частности, способны моделировать сложные нелинейные процессы пластической деформации, что делает их эффективным инструментом для анализа и оптимизации технологических режимов.

Особое значение имеет применение ИИ в системах адаптивного управления процессами холодной штамповки. Такие системы функционируют на основе обратной связи, при которой данные, поступающие с датчиков оборудования, анализируются в режиме реального времени, после чего осуществляется автоматическая корректировка параметров процесса. Это позволяет учитывать изменения свойств материала, износ штамповой оснастки и внешние воздействия, обеспечивая стабильность технологического процесса и снижая вероятность возникновения дефектов. В результате достигается повышение точности изделий и увеличение срока службы оборудования.

Алгоритмы искусственного интеллекта активно интегрируются с современными цифровыми технологиями, такими как промышленный интернет вещей, автоматизированные системы управления, цифровые двойники и облачные вычисления. Это обеспечивает непрерывный сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени, что позволяет значительно повысить эффективность управления производственными процессами и оперативность принятия решений.

Практика внедрения ИИ в процессы холодной штамповки показывает значительные преимущества, включая снижение уровня брака, повышение точности обработки, сокращение времени настройки оборудования, уменьшение затрат на контроль качества и повышение производительности. Интеллектуальные системы позволяют минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечить более стабильные результаты обработки.

Вместе с тем внедрение ИИ сопровождается рядом трудностей, к которым относятся необходимость формирования больших обучающих выборок, сложность интеграции с существующим оборудованием, а также высокая стоимость внедрения и потребность в квалифицированных специалистах. Однако развитие цифровых технологий и снижение стоимости вычислительных ресурсов постепенно способствуют преодолению данных ограничений.

Таким образом, применение алгоритмов искусственного интеллекта для контроля и оптимизации параметров холодной штамповки является эффективным инструментом повышения качества продукции и эффективности производства. Интеллектуальные системы позволяют автоматизировать процессы контроля, прогнозировать возникновение дефектов и оптимизировать технологические режимы в реальном времени. В перспективе ожидается дальнейшее развитие адаптивных систем управления, интеграция с цифровыми двойниками и переход к полностью автоматизированным производственным линиям, что обеспечит высокий уровень конкурентоспособности современных предприятий.

В современных условиях развития машиностроительного производства особое значение приобретает повышение качества продукции при одновременном снижении затрат и увеличении производительности. В этом контексте применение инструментов искусственного интеллекта (ИИ) рассматривается как перспективное направление повышения эффективности технологических процессов холодной штамповки. Внедрение интеллектуальных методов анализа и управления позволяет по-новому

подойти к решению задач контроля качества и оптимизации технологических параметров.

ИИ-инструменты, включая методы машинного обучения, глубокие нейронные сети и алгоритмы оптимизации, способны обрабатывать большие объемы данных, поступающих с производственного оборудования, и выявлять сложные зависимости между параметрами штамповки и качественными характеристиками изделий. В отличие от традиционных подходов, основанных на эмпирических зависимостях и опыте специалистов, использование ИИ позволяет сформировать более точные и объективные модели, что в перспективе может привести к существенному улучшению параметров готовой продукции.

Одним из ключевых направлений повышения эффективности является автоматизация контроля качества. Предполагается, что применение систем компьютерного зрения, основанных на сверточных нейронных сетях, позволит проводить высокоточный анализ поверхности изделий, выявляя дефекты, такие как трещины, складки и задиры. Такие системы могут функционировать в режиме реального времени, обеспечивая высокую скорость обработки информации и снижая вероятность пропуска дефектов, что особенно важно для массового производства.

Важным аспектом является также прогнозирование параметров качества продукции. Ожидается, что алгоритмы машинного обучения, обученные на основе исторических и технологических данных, смогут предсказывать отклонения размеров, изменение формы изделий и вероятность возникновения дефектов. Это позволит своевременно корректировать технологические режимы и предотвращать образование брака еще на ранних этапах производства.

Значительный потенциал ИИ проявляется в оптимизации технологических параметров холодной штамповки. Применение таких методов, как генетические алгоритмы, алгоритмы роя частиц и обучение с подкреплением, позволяет в теоретическом плане находить оптимальные сочетания параметров обработки, обеспечивающие максимальное качество изделий при минимальных затратах ресурсов. Такие подходы особенно эффективны для сложных многопараметрических процессов, где традиционные методы оптимизации оказываются недостаточно точными и трудоемкими.

Перспективным направлением является создание адаптивных систем управления, основанных на использовании ИИ. Предполагается, что такие

системы смогут осуществлять динамическую корректировку параметров штамповки в зависимости от текущих условий производства, включая изменение свойств материала, износ штамповой оснастки и влияние внешних факторов. Это позволит обеспечить стабильность технологического процесса, повысить точность изделий и снизить уровень остаточных напряжений.

Ожидаемый эффект от внедрения ИИ-инструментов в процессы холодной штамповки может выражаться в снижении уровня брака, повышении точности геометрических параметров, сокращении времени настройки оборудования и уменьшении затрат на контроль качества. Кроме того, применение интеллектуальных систем способно повысить устойчивость производственного процесса и снизить влияние человеческого фактора, обеспечивая более стабильные результаты обработки.

Вместе с тем эффективность применения ИИ во многом зависит от качества исходных данных и корректности построения моделей. Недостаточный объем обучающих выборок, наличие шумов или ошибок в данных могут привести к снижению точности прогнозирования и неэффективным управленческим решениям. Поэтому важным условием успешного внедрения ИИ является создание надежной системы сбора, хранения и обработки данных.

Таким образом, предполагаемый анализ эффективности применения ИИ-инструментов показывает, что их использование в процессах холодной штамповки обладает значительным потенциалом для повышения качества продукции, снижения уровня брака и оптимизации технологических процессов. В перспективе развитие и внедрение таких технологий может стать важным этапом на пути к созданию интеллектуальных производственных систем и реализации концепции «умного производства».

Современное развитие промышленности характеризуется активным переходом к цифровым и интеллектуальным технологиям, среди которых особое место занимает искусственный интеллект. В области холодной штамповки внедрение ИИ рассматривается как перспективное направление повышения качества продукции, оптимизации технологических процессов и снижения производственных затрат. Применение интеллектуальных методов управления позволяет по-новому организовать процессы обработки металлов, обеспечивая более высокий уровень автоматизации и точности.

Одним из ключевых направлений развития является создание интеллектуальных систем управления, способных в режиме реального времени анализировать технологические параметры и автоматически

корректировать режимы штамповки. Предполагается, что такие системы смогут адаптировать процесс к изменяющимся условиям производства, включая вариации свойств исходного материала, износ штамповой оснастки и влияние внешних факторов. В результате ожидается повышение стабильности параметров изделий и снижение вероятности возникновения дефектов.

Перспективным направлением является интеграция искусственного интеллекта с промышленным интернетом вещей. Использование сенсорных систем и сетевых технологий позволит осуществлять непрерывный сбор данных с прессового оборудования и технологических линий. Предполагается, что обработка этих данных с применением алгоритмов машинного обучения обеспечит более точный контроль состояния процесса и создаст условия для реализации концепции «умного производства», в рамках которой управление будет осуществляться на основе анализа данных в реальном времени.

Особое значение в развитии технологий холодной штамповки приобретает использование цифровых двойников, представляющих собой виртуальные модели технологических процессов и оборудования. Предполагается, что применение ИИ в рамках цифровых двойников позволит проводить моделирование процессов деформации металла, прогнозировать поведение материала и оптимизировать технологические параметры без необходимости проведения дорогостоящих физических экспериментов. Это может существенно сократить сроки разработки новых технологических решений и повысить их эффективность.

Важным направлением является использование методов глубокого обучения для анализа состояния поверхности изделий и выявления дефектов на ранних стадиях производства. Ожидается, что такие методы позволят учитывать сложные нелинейные зависимости между параметрами штамповки и характеристиками продукции, что приведет к повышению точности прогнозирования и снижению уровня брака.

Дополнительные перспективы связаны с развитием систем предиктивного обслуживания оборудования. Предполагается, что анализ данных о состоянии прессов и штамповой оснастки с использованием ИИ позволит прогнозировать их износ и своевременно проводить техническое обслуживание, предотвращая аварийные ситуации и снижая простои производства.

Кроме того, ожидается, что внедрение ИИ будет способствовать автоматизации процесса проектирования технологических операций холодной штамповки. Интеллектуальные системы смогут формировать оптимальные решения по выбору режимов обработки, конструкции штамповой оснастки и параметров процесса, что позволит сократить время подготовки производства и повысить его эффективность.

Важным аспектом развития является также повышение экологической эффективности производства. Предполагается, что использование ИИ позволит оптимизировать энергопотребление, снизить расход материалов и уменьшить количество отходов, что соответствует современным требованиям устойчивого развития промышленности.

Несмотря на значительные перспективы, внедрение искусственного интеллекта в процессы холодной штамповки связано с рядом трудностей. К ним относятся высокая стоимость внедрения, необходимость формирования больших обучающих выборок, а также потребность в квалифицированных специалистах. Однако с развитием цифровых технологий и увеличением доступности вычислительных ресурсов данные ограничения постепенно снижаются, что создает условия для более широкого распространения интеллектуальных систем.

Таким образом, предполагаемый анализ показывает, что внедрение искусственного интеллекта в процессы холодной штамповки обладает значительным потенциалом для повышения качества продукции, снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности предприятий. В перспективе ожидается дальнейшая интеграция ИИ с цифровыми технологиями, что приведет к созданию высокоэффективных, автоматизированных и интеллектуальных производственных систем нового поколения.

Заключение

В результате проведённого теоретического анализа установлено, что применение технологий искусственного интеллекта в процессах холодной штамповки обладает значительным потенциалом для повышения качества продукции и эффективности производства. В условиях ужесточения требований к точности геометрических параметров, состоянию поверхности и механическим характеристикам изделий внедрение интеллектуальных методов управления становится важным направлением развития машиностроения.

Показано, что использование алгоритмов машинного обучения, нейронных сетей и методов оптимизации позволяет осуществлять более глубокий анализ технологических процессов, выявлять скрытые закономерности и прогнозировать поведение материала при деформации. В отличие от традиционных подходов, основанных на эмпирических данных, интеллектуальные методы обеспечивают более высокую точность, адаптивность и устойчивость результатов.

Предполагается, что внедрение систем компьютерного зрения позволит значительно повысить эффективность контроля качества за счёт автоматизации обнаружения дефектов и снижения влияния человеческого фактора. В свою очередь, использование алгоритмов прогнозирования и оптимизации технологических параметров может способствовать снижению уровня брака, повышению точности изделий и сокращению затрат на производство.

Особое значение имеет развитие адаптивных систем управления, которые способны в режиме реального времени корректировать параметры штамповки с учётом текущих условий процесса. Ожидается, что такие системы обеспечат стабильность технологического процесса, снижение износа оборудования и повышение общей производительности.

Несмотря на значительный потенциал, внедрение искусственного интеллекта требует решения ряда задач, связанных с формированием качественных обучающих выборок, интеграцией с существующим оборудованием и подготовкой квалифицированных специалистов. Однако развитие цифровых технологий и увеличение доступности вычислительных ресурсов создают предпосылки для широкого распространения интеллектуальных систем в промышленности.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение искусственного интеллекта в холодной штамповке является перспективным направлением, способным обеспечить переход к интеллектуальным и высокоэффективным производственным системам. Ожидается, что дальнейшее развитие данных технологий приведёт к существенному повышению качества продукции, снижению производственных затрат и укреплению конкурентоспособности предприятий в условиях цифровой трансформации промышленности.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Altan T., Ngaile G., Shen G. **Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications**. ASM International, 2005.
2. Lange K. **Handbook of Metal Forming**. McGraw-Hill, 1985.
3. Kalpakjian S., Schmid S. **Manufacturing Engineering and Technology**. Pearson Education, 2014.
4. Groover M. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. Wiley, 2020.
5. Hosford W., Caddell R. **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**. Cambridge University Press, 2011.
6. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. **Deep Learning**. MIT Press, 2016.
7. Bishop C. **Pattern Recognition and Machine Learning**. Springer, 2006
8. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // **Nature**, 2015.
9. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks // **Neural Networks**, 2015.
10. Zhou Z. **Machine Learning**. Springer, 2021.
11. Рахимов,Д.Р “Разработка технологического процесса и штамповочной оснастки для операции четырехсторонней гибки при холодной штамповке” Дипломная работа, Ташкент, 2025.
12. Рахимов,Д.Р Международная научная и научно-техническая конференция “Интеграция науки, образования и производства в машиностроении: тенденции, проблемы и решения” Тезис «Разработка модели четырёх угловой скобы для тракторов в условиях ТТЗ»