

**В.С. Кривцов, С.А. Мазниченко, А.Н. Застела, Т.Е. Обрываева**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Украина*

## **ИМПУЛЬСНАЯ РЕЗКА ГОРЯЧЕГО МЕТАЛЛА**

Коротко изложены материалы наработок, выполненных в Проблемной НИЛ ХАИ, посвященных исследованию импульсных источников энергии в промышленности. Овещены отрасли и сферы применения импульсных нагрузок, реализуемых с помощью удара твёрдого тела-инструмента. Затронуты вопросы перспективного усовершенствования.

### **импульсная резка, тепловой привод, горючая газовоздушная смесь**

С шестидесятых годов прошлого века и до настоящего времени в отечественной и зарубежной практике металлургии и машиностроения остаётся весьма актуальной проблема использования импульсных источников энергии, в частности, для обработки металлов давлением ударом твёрдого тела. Это объясняется тем, что такие энергетические установки, характеризующиеся большими мощностями и значительными давлениями, позволяют выполнять обработку материалов с высокими скоростями деформации. Подобный подход весьма часто является решающим при обработке металлов и сплавов, отличающихся высокой прочностью и малой пластичностью, заготовок с большими размерами поперечного сечения, а также движущихся. При этом обеспечиваются улучшение качества, точность изготавливаемых изделий, сокращение времени рабочего цикла, снижение металлоёмкости оборудования, ликвидация или уменьшение отходов.

Для исследователей и производителей значительный интерес представляет возможность использования импульсных источников энергии, которые в этом случае можно применить для сообщения метательного движения подвижному бойку (твёрдому телу) с установленным на нём инструментом. Накопленная в процессе разгона бойка кинетическая энергия в последующем может быть израсходована на выполнение полезной работы – резку горячей заготовки. Количество энергии выражается известным, действительным для движущегося тела, соотношением, из которого сле-

---

дует, что тело будет обладать энергией тем большей, чем выше скорость его движения.

Таким образом, инструмент-нож, установленный на твёрдом теле-бойке относительно небольшой массы, может обладать значительным запасом энергии, если его разогнать до соответствующей скорости с помощью импульсного источника энергии – специального привода. Поэтому оборудование, построенное с использованием этого принципа, имеет по сравнению с другими устройствами большую энерговооружённость, т.е. значительную удельную (на единицу массы) мощность единичного рабочего цикла.

Импульсное деформирование (разрезание) горячего металла вдавливанием жесткого инструмента, перемещающегося с относительно высокой скоростью, благодаря повышенным энергиям и значительным давлениям на поверхности разрезаемой заготовки характеризуется энергетическими, технологическими и эксплуатационными преимуществами.

На протяжении длительного времени коллектив ученых и инженеров ХАИ занимался решением проблем высокоскоростной обработки давлением, сформировавшихся в ключевых отраслях промышленности, в частности, металлургии и машиностроении в том числе, авиационной и оборонной сферах. Итогом выполненной работы явились результаты многолетних исследований и разработок, посвящённых созданию технологии и оборудования для высокоскоростной поперечной резки горячих сортовых заготовок и относящихся к сфере обработки материалов давлением, в частности, к области импульсных воздействий на обрабатываемый материал ударом твёрдого тела.

Работы выполнены в специализированном подразделении – Проблемной научно-исследовательской лаборатории по использованию импульсных источников энергии в промышленности, вошедшей в семидесятипятилетнюю историю Харьковского авиационного института (ныне Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина), под научным руководством одного из основоположников «школы ХАИ» в области импульсной обработки металлов давлением доктора технических наук, профессора В.Г. Кононенко.

Высокий уровень научных исследований и промышленных разработок в 1975 году отмечен Государственной премией Украины в области науки и техники.

Научные и проектные работы посвящены вопросам ударной импульсной

резки ножами заготовок из горячего металла в металлургии и машиностроении. Материалы освещают обширные теоретические и экспериментальные исследования технологии и процесса динамической резки горячего металла пластинчатыми или клиновидными ножами, особенности работы газовоздушного привода, проектные разработки высокоскоростного оборудования – машин импульсной резки, а также итоги опытно-промышленных, промышленных испытаний и эксплуатации изготовленных образцов режущих агрегатов и серийных комплексов для импульсного разделения на части сортовых горячих стальных заготовок в технологических линиях непрерывного литья, прокатном и заготовительном производствах.

В перечне технологических операций обработки давлением при производстве сортового металла (литьё заготовок, в том числе непрерывным способом) и его переработке (прокатке, ковке) в металлургической и машиностроительной отраслях, т.е. когда заготовки имеют относительно высокую температуру (850...1150 °С) и зачастую находятся в движении, значительную долю составляют разделительные операции. Суть подобных действий заключается в необходимости отделять от исходной заготовки части требуемой для дальнейшей обработки (прокатки,ковки, штамповки) мерной длины, а также отрезать дефектные концы, отбирать пробы и т. п.

Принцип накопления кинетической энергии массой механической системы, объединённой с установленным на ней деформирующим инструментом, и последующего расходования этой энергии за короткое время на выполнение полезной работы можно считать наиболее целесообразным при создании импульсного оборудования ударного действия и, в частности, для реализации высокоскоростного способа резки горячих заготовок поперечным ударом пластинчатого или клиновидного ножа.

Скоростная резка характеризуется большими скоростями и ускорениями деформаций. Такое течение процесса практически не зависит от характера источника энергии и свойств передаточной среды и его можно считать общим при импульсном нагружении горячих заготовок и при высокоскоростной резке в частности. Однако при этом необходимо знание свойств их материала при скоростном нагружении и температурно-скоростных зависимостей его сопротивления деформированию при температурах деформации.

Изучение и анализ картины течения металла в зоне резания, определение усилия резки и работы деформирования при известных граничных условиях позволило перейти к проектированию оборудования, инструмента

---

для импульсной резки горячих заготовок, а также технологии скоростного их разделения на мерные части, пригодные для последующей переработки. Численные значения этих величин являются основой и исходными данными для определения кинематических, динамических и прочностных характеристик технологического процесса резки, оборудования в целом и отдельных его элементов, а также инструмента-ножей.

Специфика импульсного процесса высокоскоростной резки обуславливает наличие специального привода, предназначенного для придания энергии движения подвижным массам-бойкам с установленным на них инструментом для резки. Создание такого привода сопряжено с выбором принципа действия, анализом возможных схем преобразования и передачи энергии, определением качественных и количественных его характеристик, их оптимизацией, выработкой компоновочных и конструктивных схем привода, термо- и газодинамическими расчетами и т.д.

В результате многих экспериментальных исследований и промышленной эксплуатации импульсного режущего оборудования различного назначения, в том числе и для резки горячих стальных заготовок в линиях прокатки и непрерывного литья, установлено, что наиболее целесообразно в качестве силового привода подвижных частей режущего агрегата применять тепловой аperiодический двигатель внутреннего сгорания (который характеризуется изменяемым относительно длительным временем между соседними циклами) с использованием принципа превращения в его окислительной камере потенциальной (химической) энергии энергоносителя в тепловую с последующим переходом её в процессе дальнейшего преобразования в кинетическую энергию движения подвижных масс с инструментом.

Реализация этого кинематического принципа нашла отражение в созданных образцах опытного, а затем и промышленного, в том числе серийного, оборудования для импульсной резки горячих металлических заготовок. Машины импульсной резки (МИР) – уникальны и не имеют мировых аналогов. МИР лишены свойственных общепринятым режущим устройствам недостатков и позволяют значительно улучшить работу технологических линий получения и переработки сортовых заготовок. Наиболее эффективно применение МИР как режущего агрегата в составе оборудования машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Существующая тенденция увеличения производительности МНЛЗ за счет роста скорости вытягивания слитка до 10 и более м/мин позволяет сделать вывод, что только

---

МИР можно применять в качестве агрегата резки на таких скоростях. МИР в составе автоматизированных комплексов дают возможность решить многие прикладные задачи и производственные проблемы в металлургической и машиностроительной отраслях. В промышленности эксплуатируется свыше 30 единиц импульсного оборудования ударного действия с тепловым приводом.

Разработанная технология высокоскоростной резки на части горячих металлических заготовок динамическим внедрением ножей и импульсное режущее оборудование, реализующее эту технологию – весьма широкая область применения основных принципов обработки материалов давлением с приложением нагрузки ударом твёрдого тела. Однако они далеко не исчерпывают всех потенциальных возможностей скоростных силовых процессов и технологий.

Тепловой импульсный привод, в котором в качестве базового использован принцип химико-механического преобразования энергии, основанный на сжигании сжатой топливовоздушной горючей смеси с последующим расширением продуктов горения для разгона подвижного рабочего органа (твёрдого тела) с инструментом, как показали исследования и обширная практика промышленного применения, наиболее эффективен и приемлем в конструктивном и эксплуатационном аспектах.

Созданный и отработанный привод и обслуживающие его системы, кроме применения в составе оборудования для резки горячего металла, вполне пригодны к использованию в устройствах для осуществления других разновидностей технологических процессов, основанных на ударном воздействии движущегося с большой скоростью инструмента на обрабатываемую среду.

Одним из перспективных и востребованных направлений применения высокоскоростного деформирования является резка сортового и профильного проката в холодном состоянии на заготовки для дальнейшего получения деталей механической обработкой, а также ковкой или штамповкой после предварительного нагрева.

В результате проведенных в ХАИ теоретических и экспериментальных исследований была разработана технология и создано опытно-промышленное оборудование для резки холодного сортового проката с энергоприводом внутреннего сгорания аperiодического действия, работающего на горючей газовой смеси топлива (углеводородные газы) и сжатого воздуха.

---

Тепловой привод, аналогичный машинам для «горячей» резки, использован при создании оборудования для осуществления, например, процессов, сопутствующих утилизации отработанных тепловыделяющих элементов атомных электростанций (ТВЭЛ АЭС). Так, в настоящее время в эксплуатации на территории СНГ находится около 50 ядерных блоков АЭС. Выработка ресурсных возможностей элементов оборудования на этих станциях обусловила возникновение проблемы их демонтажа, утилизации и захоронения. Одной из главных задач при этом является порезка и утилизация высокорadioактивных трубчатых элементов, составляющих конструкцию энергоблоков: трубопроводов, ТВЭЛов и т.п., для которых применение известных технологий разделения неэффективно вследствие низкого коэффициента заполнения утилизационного контейнера.

С учётом специфики условий АЭС при разделке технологических каналов следует соблюдать такие требования как полное дистанционное управление оборудованием, адаптивность к условиям и системам АЭС, минимальные габариты и масса, простота переналадки во всем диапазоне сечений технологического канала и т.п. В этой связи в ХАИ была создана импульсная режущая установка с тепловым газовоздушным приводом и дистанционным управлением для утилизации тепловыделяющих элементов ядерного реактора. В машине реализована технологическая схема, в соответствии с которой отрезаемую часть вначале сплющивают, а затем отделяют сдвиговым деформированием с одновременным сплющиванием следующего участка канала. Такая схема, как показали экспериментальные исследования, оказалась наиболее рациональной при разделке изделий трубчатой формы.

Исследования резки горячих металлических заготовок двухсторонним внедрением клиновидных ножей получили развитие при создании технологии и оборудования для разделения ударом коротких клиновидных ножей холодного проката на заготовки для дальнейшей металлообработки. Проведенные экспериментальные работы показали перспективность этого способа для получения заготовок из пластичных сталей, а также относительно хрупких сталей с повышенным содержанием углерода, марганца и т.п. Таким образом, доказана возможность получения заготовок для дальнейшей прокатки, облойной штамповки длинномерных изделий, а также и для штамповки в торец. В процессе работ выявлены характерные особенности процесса разделения холодного проката ударом коротких ножей с

---

большим углом клиновидности.

Для резки термомеханически упрочненного проката в ХАИ предложен метод импульсной резки и разработаны технология и оборудование для его реализации. При создании оборудования использован принцип механического сжатия с помощью кривошипно-шатунного взводящего механизма энергонесущего газа (воздуха, азота) с последующим его расширением для придания рабочему органу достаточно высокой скорости.

При изготовлении деталей из металлических заготовок в авиационной, машиностроительной и других отраслях, связанных с металлообработкой, образуется большое количество стружки чёрных и цветных металлов. Использование (утилизация) стружки в рассыпном виде сопровождается целым рядом проблем.

Установлено, что положительный эффект скоростного деформирования начинает сказываться при скоростях инструмента от 10...12 м/с. При скоростях около 20 м/с из титановой стружки и стружки жаропрочных сплавов образуются брикеты, плотность которых достигает 0,8...0,9 плотности сплошного металла.

Значительный положительный опыт создания и применения технологии импульсного брикетирования сыпучих материалов, в том числе и стружки из разнообразных чёрных металлов и цветных сплавов (также титановых), а также проектирования и изготовления оборудования для выполнения этой технологической операции накоплен в ХАИ, где выполнен комплекс соответствующих исследований и опытно-конструкторских работ.

Энергетические возможности импульсного метода и созданного в ХАИ оборудования дают возможность образовывать из стружки не только брикеты высокой прочности и плотности, пригодные для переплава, но и формировать целый ряд изделий. Например, изготавливать из стружки чёрных металлов вкладыши-пробки для защиты дна глухонных изложниц при заливке в них стали, получать расходоуемые электроды из титановой губки, а также брикеты из стружки титановых сплавов.

Таким образом, импульсное формование брикетов из стружки металлов и сплавов самой широкой номенклатуры, изготовление заготовок и изделий из стружки и других сыпучих материалов – одно из прогрессивных направлений в решении важной народнохозяйственной задачи – эффективной утилизации дорогостоящих отходов машиностроительных отраслей промышленности, т.е. экономии вторичных ресурсов металла.

---

Среди исследованных в ХАИ технологических процессов высокоскоростной обработки материалов давлением с применением импульсного оборудования с тепловым приводом можно выделить использование этих машин для реализации процессов объёмной штамповки деталей.

Увеличение скорости деформирования изменяет условия течения металла. Значительно возрастает скорость истечения материала, заметными становятся сопутствующие эффекты в очаге деформации и по границам скольжения, что способствует лучшему заполнению полости штампа и уменьшению контактного трения, существенно сокращается время деформирования, т.е. многопереходную штамповку можно выполнять в течение одного цикла без промежуточных подогревов.

На высокоскоростном оборудовании можно изготавливать детали высокой точности с минимальными штамповочными уклонами и входными радиусами в результате действия больших кратковременных деформирующих усилий. Именно этим обеспечивается возможность затекания металла в глубокие и узкие полости при малых радиусах закругления.

Весьма перспективным может оказаться использование высокоскоростных типов энергоприводов для выполнения операций свободнойковки или горячей штамповки деталей за один или даже несколько переходов, поскольку применённая пневматическая скоростная система возврата бойка в исходное положение позволяет значительно сократить подготовительное время рабочего цикла.

Весьма перспективна разработанная в ХАИ схема машины с верхним расположением энергопривода и системой быстрого возврата бойка в верхнее положение посредством пневматических цилиндров. Такую импульсную машину можно применять для горячейковки или штамповки, в том числе за несколько циклов, поскольку система быстрого пневмовозврата позволяет осуществить законченный технологический процесс за любое число ударов.

Многokrатное импульсное силовое воздействие на обрабатываемый материал в течение короткого периода времени даёт возможность выполнить технологическую операцию, на которую требуются затраты значительной энергии, с помощью машины относительно небольшой мощности, но за несколько рабочих циклов. Работа по такой технологической схеме позволяет спроектировать и применить менее громоздкое и с меньшей массой оборудование, чем одноударная импульсная машина, а высо-

---

коэнерговооруженный газовоздушный энергопривод с электрическим зажиганием может совершать рабочие циклы с относительно высокой частотой – 12...15 циклов в минуту.

Представляют значительный промышленный интерес многие другие прикладные задачи металлургической и машиностроительной отраслей, разрешить которые с достаточной эффективностью возможно только с применением высокоскоростных воздействий. Сюда следует отнести, в частности, и большое количество проблем изготовления заготовок и деталей из труднодеформируемых материалов, относящихся к номенклатуре авиационно-космической техники и других смежных производств.

Существует множество ещё не решённых задач или не исследованных в полном объёме проблем как в теоретическом аспекте, так и в экспериментально-эксплуатационном. Также имеется солидный пласт недостаточно исследованных проблемных вопросов, касающихся особенностей поведения материалов при ударном приложении нагрузок, получения изделий высокоскоростной ковкой и объёмной штамповкой из горячих заготовок, исследования свойств цельных материалов и разнообразных сыпучих сред в процессе скоростного формоизменения при различных температурно-скоростных условиях. Многие задачи высокоскоростного деформирования применительно к разделительным процессам, в том числе резке горячего металла, также ждут своего решения.

*Поступила в редакцию 10.05.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Г. Гребенников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.