УДК 621.983.3

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОМАГНИЕВОГО АЛЮМИНИЕВОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СПЛАВА

© 2000 Ф.В. Гречников¹, В.В. Уваров², Г.В. Черепок¹, Е.А. Носова²

¹Волжский филиал Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Самара ²Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведено комплексное изучение свойств листовых полуфабрикатов из деформируемого высокомагниевого сплава. Оценена перспективность его использования в машиностроении. Осуществлена опытно-промышленная выплавка литых заготовок в заводских условиях, исследованы их структура и свойства.

Опыт развитых в промышленном отношении стран показывает, что одним из эффективных путей решения задачи коренного улучшения экономических и экологических показателей современных автотранспортных средств (ATC) является снижение их веса.

Предпринятые во многих странах попытки решить эту проблему за счёт расширения применения пластмасс при изготовлении автомобильных кузовов и других несущих элементов конструкций не получили развития не только по причине высокой стоимости этих материалов, но главным образом изза невозможности эффективно регенерировать и утилизировать пластмассовые детали вышедших из эксплуатации АТС.

В связи с этим сейчас в ряде ведущих фирм по производству АТС развёрнуты работы по замене сталей для вытяжки-формовки кузовов, облицовочных деталей и несущих профильных конструкций на алюминиевые полуфабрикаты. Так, алюминиевый кузов легкового автомобиля даёт экономию при идентичной прочности и жёсткости на 35-40%, а расход топлива уменьшается на 1,3-1,5 литра на 100 км пробега, при существенном улучшении динамических и экологических характеристик транспорта [1,2].

При этом внимание конструкторов АТС всегда привлекали высокопрочные сплавы системы алюминий-магний. Однако область использования деформируемых сплавов ограничивалась содержанием магния около 6% (сплав типа АМг6). Сплавы, более близкие к эвтектическому типу (10-11%магния) относили обычно к недеформируемым литейным сплавам [3]. Хотя они и характеризовались высокими прочностными свойствами, достаточной коррозионной стойкостью, но уровень их пластичности не позволял проводить интенсивные процессы пластического деформирования и получать листовые и профильные полуфабрикаты для последующего формоизменения в операциях холодной штамповки.

Анализ применяемых технологий выплавки алюминиевых сплавов и оценка качества отливок позволили найти новый подход получения литых заготовок с заданным уровнем свойств. В основе этого подхода лежит комплексная система регламентированного формирования структурно-фазового состояния сплава за счёт определённого порядка загрузки легирующих компонентов без образования нерастворимых окислов, микролегирования, интенсификации процессов внепечной обработки и физико-химических способов воздействия на расплав в процессе затвердевания отливки [4].

В качестве деформируемого высокопрочного сплава в данной работе исследован опытный сплав системы алюминий-магний с содержанием магния около 10% и добавками циркония, титана, кобальта, бора и бериллия (сплав типа AMr10).

При этом решались две взаимосвязанные основные задачи: во-первых, комплексная оценка структуры, механических и технологических свойств пилотных небольших партий материалов; во-вторых, разработка промышленной технологии производства литых деформируемых заготовок под прокатку и прессование в условиях Самарского металлургического завода.

Основные параметры, выявленные при механических и технологических испытаниях опытных листовых заготовок сплава АМг10 в сравнении с рядом других листоштамповочных материалов приведены в табл.1.

Анализ данных показывает, что механические и технологические характеристики АМг10 близки по свойствам к кузовным сталям типа 08Ю и 08ГСЮТ(Φ) и имеют уровень перспективных материалов ведущих фирм автостроителей. При этом удельная прочность АМг10 выше сталей примерно в 3 раза. Следует также отметить, что показатели механических и технологических свойств превосходят отечественные и зарубежные сплавы системы алюминий-магний.

Второй этап работы включал выплавку опытно-промышленной партии слитков в производственных условиях Самарского ме-

таллургического завода и исследование свойств, структуры и технологической способности слитков деформироваться при горячей обработке давлением. Плавка осуществлялась в печи ёмкостью 3 т, в состав шихты входили: алюминий марки АХ7 – 2,5т, лигатура Al-Zr – 0, 45т, первичный магний – 0,315т. Температура плавки составляла 720°. Рафинирование производилось карналитовым флюсом. Расплав модифицировали как в печи, так и в процессе литья лигатурой Al-Ті-В из расчёта 0,02%. Отливка круглых слитков диаметром 530 мм осуществлялась методом полунепрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор по технологическим параметрам серийной технологии литья слитков из АМг6. Слитки гомогенизировали при температуре 480-490° с выдержкой 17 часов. После гомогенизации от двух из четырёх слитков (№1 и 4) были отобраны темплеты для следующих исследований:

- изучение макро- и микроструктуры в раз-

Таблица 1.	Сравнительная ха	рактеристика	механических	к и технологи	ческих се	зойств	сплавов,
предназначеннь	іх для холодной шта	амповки					

Е	Oc	сновные м	еханические	Технологические свойства				
Марка и ти сплава	Предел прочности б _в , МПа	Предел текучести б _{0,2} , МПа	Полное относитель- ное удлинение, δ ₅₍₄₎ , %	Равномер-ное удлинение ठ _{р5(4)} , %	Удельная прочность б₀/γ, км	Глубина лунки по Эриксену h, мм	Показатель упрочнения п	Показатель нормальной анизотропии м
Амг10Т4	385- 405	195- 210	36,0-38,0	28,0-	14,8-	9,4-9,6	0,33	0,42-
АМг6М	340- 350	170- 180	20,0-22,0	16,0- 18,0	13,0- 13,5	9,1-9,2	0,31	0,41- 0,42
сталь 08ГСЮТ(Ф)	390- 400	не менее 290	не менее 30,0	23,0- 24,0	5,0- 5,1	10,8- 10,9	0,35	0,51- 0,53
сталь 08Ю(ОСВ)	250- 350	Не менее 195	Не менее 36,0	25,0- 26,0	До 4,5	10,9- 11,0	0,33	0,51- 0,52
сплав 844-0 (фирма Sidal)	310- 320	180- 185	22,0-23,0	-	12,0- 12,3	9,2-9,3	0,32	0,42- 0,43
сплав 666-T4 (фирма Sidal)	310- 320	160- 170	28,0-29,0	-	11,0- 11,5	8,9-9,2	0,29	0,35- 0,37
Перспективные параметры Аl- сплавов японских автостроителей	290- 300	190- 200	35,0-39,0	-	13,5- 13,8	9,0-10,0	До 0,34	-
Требуемые на перспективу параметры фирмы Audi	360- 400	195- 220	32-40	-	13,8- 15,4	9,0-10,0	До 0,35	-

Температу	Слиток 1				Слиток 4			
ра испытания, ^о С	у _{0,2} , МПа	у _в , МПа	д ₅ , %	ψ, %	у _{0,2} , МПа	у _в , МПа	д ₅ , %	ψ, %
350	79	83	57,0	44,9	72	77	60,5	52,4
375	61	63	75,6	53,8	58	61	70,0	53,9
400	46	48	93,0	70,0	42	45	73,3	58,0
425	35	37	93,5	70,4	42	45	83,3	58,0
450	28	30	98,6	72,5	27	29	92,0	66,2
475	21	23	93,3	67,5	20	21	74,1	61,8

Таблица 2. Механические свойства литого АМг10 при различных температурах нагрева

личных зонах сечения слитка;

- исследование ликвации, пористости и газосодержания;

- определение прочностных и пластических свойств при различных температурах нагрева.

Анализ результатов исследований показывает, что слитки АМг10 имеют мелкозернистую структуру, причём для периферийных зон характерно дендритное строение, для остальных – субдендритное. В микроструктуре наблюдаются дисперсные выделения интерметаллидов Al₃Zr. Для всех слитков характерна некоторая пористость и ликвация по магнию, которая не превышает 1%. Содержание водорода в литых заготовках колеблется в пределах 0,31-0,45 см³/100г массы.

Температурные испытания (табл.2) позволили выявить технологическую пластичность и прочностные характеристики литых заготовок.

В интервале максимальной пластичности 425-450°С удлинение достигает 83-98%, а величина сужения 60-70%, что характеризует сплав АМг10 как весьма пластичный, который по уровню пластичности не уступает стандартному сплаву АМг6.

Комплекс изученных свойств и достаточно высокая технологичность на различных этапах металлургического производства позволяет оценить сплав АМг10 как один из перспективных материалов для автомобилестроителей и других производителей транспортной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Листовой материал для изготовления кузовов легковых автомобилей. М.:ВИНИ ТИ.1990.
- 2. *Куликов А.В.* Кузов из алюминия и по почти безотходной технологии // Авто. 1994. №2.
- 3. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ.изд./ Алиева С.Г., Альтман Л.Б., Амбарцумян С.М. и др. М.: Металлургия, 1984.
- Способ литья алюминиевых сплавов, алюминиевый сплав и способ производства из него промежуточных изделий / Патент на изобретение РФ №96113996/02. 1997.

PERSPECTIVES FOR INDUSTRIAL PRODUCTION OF ALUMINIUM WROUGHT ALLOY WITH HIGH MAGNESIUM CONTENT

© 2000 F.V. Grechnikov¹, V.V. Uvarov², G.V. Cherepok¹, Y.A. Nosova²

¹Volga Branch of Institute of Metallurgy and Materials named for A.A. Baikov of Russian Academy of Sciences, Samara ²Samara State Aerospace University

The complex research of properties of aluminum wrought alloy sheets was conducted. This alloy has the high content of magnesium. The perspective of its utility in machine building was assessed. The experimental industrial melting of poured goods was made in foundry conditions. Structure and properties of these goods were researched.

УДК 681.2:621.785:658.512.6

СТАБИЛИЗИРУЮЩАЯ ТЕРМООБРАБОТКА СПЛАВОВ И ЕЕ НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

© 2000 О.К. Колеров, А.Н. Логвинов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Показаны важность правильного выбора режимов стабилизирующей термической обработки авиационных сплавов и недостаточность ее нормативного обеспечения.

Стабилизирующая термическая обработка /СТО/ сплавов обеспечивает длительное сохранение постоянства размеров детали в условиях эксплуатации. Стабильность размеров является характеристикой высокого качества инструмента, элементов силовых конструкций и изделий специального назначения. В частности, стабильность размеров деталей прецизионных систем в аэрокосмической технике гарантирует функциональные свойства узлов и обеспечивает ресурс агрегата в целом.

Оптимальные режимы СТО зависят от физико-химических свойств основы сплава, химического и фазового составов, температуры и характера среды при эксплуатации изделий, термокинетики фазовых и структурных превращений, а также величины и соотношения термических коэффициентов линейного расширения фаз в гетерогенных сплавах и композиционных материалах [1].Важное место при этом занимает первичная рекристаллизация (ПР): именно ее термокинетические особенности определяют в основном оптимальные режимы СТО сплавов. В отличие от превращений II-ого рода она может происходить во всех металлических системах после холодной деформации выше критической степени (3...10%) при нагревании до определенной температуры. Для повышения размерной стабильности сплавов их легируют элементами, которые способствуют росту температур начала и завершения ПР и тем самым замедляют ее кинетику. При легировании легких сплавов, в том числе и алюминиевых, такие элементы получили название антирекристаллизаторов [2].

Выбор оптимальных режимов СТО от-

нюдь не прост, этот вопрос довольно глубоко и неоднократно обсуждался в литературе [1]. Не потерял актуальности и к настоящему моменту [3]. Вследствие важности вопроса и большого разнообразия промышленных сплавов, применяемых в изделиях и устройствах с повышенными требованиями к размерной стабильности, существенное значение приобретает нормативное обеспечение СТО.

Статья посвящена сложившемуся к настоящему времени положению в нормативной документации по СТО сплавов.

Оптимальные режимы СТО отечественных материалов, разработанных до 1972 г., сведены в ГОСТ 17535-72 [4]. В зависимости от основы сплава и категории точности детали данным нормативом рекомендованы три разновидности обработки: отжиг рекристаллизационный, стабилизирующий отжиг и стабилизирующее старение. Варьируемые в них параметры режимов – температура нагрева и длительность изотермической выдержки. Неизменный параметр – среда, а именно: воздух. В отношении некоторых сплавов оговорены температуры обработки холодом и скорости изменения температуры в ходе СТО.

Критериями предварительного контроля СТО или прогноза уровня стабильности размеров сплавов по нормативу служат характеристики размерной стабильности сопротивления микропластической деформации, которыми являются условные пределы текучести и релаксации напряжений ползучести. Для фигурирующих в нормативе сплавов приведены значения условных пределов упругости и релаксации напряжений.

За прошедшее с момента разработки стандарта [4] время появились результаты,

свидетельствующие о необходимости проведения механических испытаний не только на воздухе, но и в вакууме, что особенно важно для материалов аэрокосмической техники. Так, из результатов работ [5,6] следует, что вакуум оказывает деструктивное влияние на металлические сплавы и полимеры. Подобное влияние выражается в изменении межплоскостных расстояний кристаллических тел и росте доли аморфной фазы в полимерах. Это не может не сказаться на уровне механических свойств, т.е. на величине условных пределов упругости и релаксации напряжений, а также на самой размерной стабильности. Например, сопротивление микропластической деформации величиной 2,5 10-5 в алюминиевом сплаве АМг6 составляет в нормальных условиях 150 МПа, а в вакууме – 160 МПа, т.е. на 7% больше, чем на воздухе.

Таким образом, отсутствие в рекомендациях норматива [4] вакуума как среды испытаний сплавов на характеристики размерной стабильности и проведения СТО представляется нам недостатком.

Однако неизмеримо более существенный пробел нормативного обеспечения СТО в целом заключается в отсутствии документа на метод определения условного предела релаксации напряжений, рекомендуемого нормативом [4] в качестве одного из критериев размерной стабильности. При этом, как ни парадоксально, существует и действует ныне ГОСТ 26007-83 «Методы испытания на релаксацию напряжений».

Отсутствие норматива на метод определения условного предела релаксации напряжений если не делает вообще невозможным, то, по меньшей мере, существенно затрудняет сопоставление результатов, полученных коллективами различных исследовательских, проектных и производственных учреждений, поскольку вероятность использования ими одинаковой методики, т.е. совокупности приемов, средств, последовательности оценок, точности операций и т.п., довольно мала. А без сопоставления не будет и воспроизводимости результатов, что ставит под сомнение возможность разработки перспективных сплавов с повышенной размерной стабильностью.

Что касается определения условного предела упругости, рекомендуемого нормативом [4] в качестве другого критерия размерной стабильности, то свой норматив здесь существует. Это известный в сфере механических испытаний стандарт – ГОСТ 1497-84, который действует и ныне. Однако методу определения условного предела упругости по ГОСТу 1497-84 присуща столь низкая точность, что можно говорить лишь о качественной оценке. Причиной является многократное приложение нагрузки к одному и тому же образцу, вследствие чего материал подвергается наклепу.

И, наконец, самый большой урон нормативному обеспечению СТО нанесло решение 1977 г. о продлении действия норматива [4] на неограниченный срок без изменений и дополнений. Оно создало двусмысленную ситуацию. С одной стороны для сплавов, внедренных в промышленность и разработанных до 72 г., норматив есть и действует поныне. Но с другой в него закрыт доступ материалам, разработанным более чем за четверть минувшего века, и сплавам века грядущего. Кстати сказать, к настоящему времени новых сплавов разработано уже на порядок больше, чем всех фигурирующих в [4].

Негативные последствия принятого решения помимо двусмысленности проявляются и в ином.

1. Оптимальные режимы СТО новых сплавов разработчики распределяют по техническим условиям /ТУ/ разной степени доступности.

2. Коллективы исследовательских институтов и производственных лабораторий, занимающиеся СТО, вынуждены проводить параллельный поиск.

3. Из-за различной степени доступности ТУ по режимам СТО намечаются недоразумения с непредсказуемым исходом.

4. И, наконец, без периодического пополнения новыми материалами норматив [4] постепенно становится вообще ненужным, ибо [4]- принципиально иной стандарт, нежели упомянутый ГОСТ 1497-84 по испытаниям материалов вне зависимости от даты их разработки.

Правда, и упомянутый стандарт прояв-

ляет несоответствие времени не только низкой точностью оценки условного предела текучести. Кроме этого, ГОСТ 1497-84 оказался не пригоден для испытаний композиционных материалов, в частности, алюминий – бор [7].Тем не менее, по определению макроскопических свойств металлических сплавов упомянутый норматив пока остается незыблемым.

Таким образом, как выяснилось почти через четверть века, и без того скромное на сегодня нормативное обеспечение СТО сплавов решением 1977 г. оказалось сведенным к нулю.

К чему может привести рассредоточение сведений о режимах СТО новых сплавов по узковедомственным ТУ покажем на примере алюминиевого сплава 1570, внедренного в промышленность в 1993 году. Это не упрочняемый термической обработкой деформируемый сплав, близкий по химическому составу к своему промышленному аналогу, сплаву АМг6, только дополнительно легированный скандием. Последний по сей день является лучшим антирекристаллизатором [2] алюминиевых сплавов. Химический состав сплава 1570 приведен в ТУ 1-809-420-83, а уровень механических свойств дан в ТУ 1-809-615-82 и ТУ 1-809-681-82. Рекомендуемые ТУ режимы стабилизирующего отжига аналогичны таковым для сплава АМг6, фигурирующего в нормативе [4]: температура 320°С, изотермическая выдержка 2-4 ч, среда-воздух.

По указанным режимам была проведена СТО сплавов АМг6 и 1570. В качестве образцов использовали катаные пластины размерами 100х100 мм и толщиной 1,5 мм. Контроль стабильности размеров осуществляли после термоциклической обработки (ТЦО) в температурном интервале от -80 до +150°С, соответствующем условиям эксплуатации деталей прецизионных систем аэрокосмических аппаратов. Вместе с тем определяли условные пределы упругости по методическим указаниям 207/514-85 и релаксации напряжений – по методуказаниям 207/534-86. Оба документа утверждены Центральным научноисследовательским институтом материалове-

дения (ЦНИИМВ).

Согласно полученным результатам оказалось, что вопреки более высокому уровню характеристик размерной стабильности сплава 1570 в сравнении со сплавом АМг6 изменение размеров в нем после ТЦО больше. При этом в направлении прокатки листа величина изменения превзошла предел допуска для 1-ой, самой низкой категории точности [4]. Если из сплава 1570, прошедшего СТО по рекомендуемым ТУ режимам, изготовить элементы навигационной системы космического агрегата, то на 4-м – 5-м витках система лишится функциональных свойств с определенной вероятностью более неприятных последствий для агрегата в целом.

Причины столь низкой размерной стабильности сплава 1570 после СТО по рекомендуемым ТУ режимам заключается в следующем. При довольно резкой смене температур, сопровождающей ТЦО, в сплаве, рекристаллизованном после больших (около 80%) обжатий лишь частично [8], продолжаются процессы если не ПР, то, по крайней мере, возврата. Это процессы перераспределения структурных несовершенств, направленность которых вдоль вектора прокатки обусловлена сосуществованием двух ярко выраженных кристаллографических текстур деформации и рекристаллизации [9]. В сплаве АМг6 ПР завершена в ходе СТО. Поэтому размерная стабильность в нем выше, чем в сплаве 1570, несмотря на пониженный по сравнению с последним уровень микромеханических свойств.

Высказанные соображения подтверждаются результатами СТО сплава 1570, проведенной при температуре завершения ПР, т.е. выше 320°С [8]. После нее изменение размера вдоль направления прокатки вследствие ТЦО не превысило допускаемого по [4] предела изменений для 3-ей, самой высокой, категории точности.

Как следует из приведенных данных, рассредоточение сведений об оптимальных режимах СТО сплавов в узковедомственных ТУ сеет путаницу, чреватую серьезными последствиями, и вызывает неоправданные затраты на повторные исследования.

Выводы

1. ГОСТ 17535-72, как единственный норматив по стабилизирующей термообработке сплавов, целесообразно превратить в реально действующий документ, открыв в него доступ материалам, созданным более чем за четверть минувшего века. Вместе с тем требуется разработка отсутствующего до сих пор норматива по определению условного предела релаксации напряжений. Его основой могли бы стать методические указания 207/534-86, утвержденные ЦНИИМВ.

2. Если не принимать во внимание скромных и порой сомнительных сведений об оптимальных режимах стабилизирующей обработки в ведомственных ТУ, то можно считать, что нормативное обеспечение вопроса с1977 г. фактически отсутствует.

3. Отсутствие нормативного обеспечения, вызывая в назначении режимов обработки путаницу, чреватую серьезными последствиями, и обуславливая неоправданные затраты на параллельные поиски уже найденных оптимальных вариантов, тормозит развитие отечественной науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Хенкин М.П., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1974.
- 2. Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д.

Алюминиевые сплавы, легированные скандием // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. №1.

- 3. Захаров В.В. Стабильность структуры в алюминиевых сплавах с литием // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. №1.
- ГОСТ 17535-72. Детали приборов высокоточные металлические. Стабилизация размеров термической обработкой. М.: Госком стандартов Совмина СССР.
- Логвинов А.Н. Взаимосвязь структурных изменений с характеристиками размерной стабильности материалов при эксплуатации в условиях вакуума // Автореф. диссерт. на соиск. уч. ст. доктора техн. наук. М.: МАТИ. 1997.
- Колеров О.К. Особенности рентгеноструктурного анализа металлизованных плёнок полимеров // Заводская лаборатория. 1995. Т.61. №3.
- 7. Логвинов А.Н., Трегуб В.И., Колеров О.К. Образец для механических испытаний волокнистых композиционных материалов // Измерительная техника. 1993. №10.
- 8. *Колеров О.К., Логвинов А.Н., Трегуб В.И.* Особенности первичной рекристаллизации в сплаве 1570 // Металловедение и термическая обработка металлов. 1994. №12.
- 9. *Колеров О.К.* Кинетика и текстура рекристаллизации в листах разной толщины из сплавов алюминия // Металловедение и термическая обработка металлов. 1997. №3.

STABLE HEAT TREATMENT OF ALLOYS AND IT'S STANDARDS GUARANTEE

© 2000 O.K. Kolerov, A.N. Logvinov

Samara State Aerospace University

The importance of right choice of the stable heat treatment conditions to aviation alloys and limitation it's standards guarantee are shown.

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ РЕЗКА ТРУБ. МЕХАНИЗМ. КАЧЕСТВО

© 2000 В.А. Глущенков¹, А.Е. Бурмистров²

¹Волжский филиал Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Самара

² Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривается механизм разделения полых заготовок при магнитно-импульсном нагружении. Исследована кинематика процесса разделения при различных режимах нагружения и соотношениях геометрических параметров заготовки, индуктора, матрицы. С учетом металлографических исследований предложена модель поведения металла в очаге деформации, которая позволяет обоснованно управлять процессом с целью достижения требуемого качества деталей.

В изделиях современного машиностроения широко используются детали и узлы, изготавливаемые из трубчатых заготовок. В процессе производства большинство трубчатых заготовок подвергается операциям резки. Одним из перспективных способов резки тонкостенных труб из материалов с высокой электропроводностью является резка их с использованием импульсного магнитного поля [1-3]. Однако широкое промышленное внедрение технологий магнитно-импульсной резки сдерживается недостаточной глубиной исследований закономерностей процесса разделения полых заготовок при импульсном нагружении.

При проведении исследований использовалась технологическая оснастка, схема которой представлена на рис.1. Режущая матрица 3 была изготовлена со скосом режущей кромки под углом 10° , что позволило более точно фиксировать момент отделения от заготовки 4 припуска 6 при обработке кинограмм процесса. Конструкция технологической оснастки обеспечивала установку заготовки и матрицы соосно индуктору 5 таким образом, что режущая кромка находилась посередине рабочей зоны индуктора.

Результаты исследования кинематики процессов представлены в статье для обрезки припуска на трубчатых заготовках из алюминиевого сплава AMr2M диаметром D=63 мм с толщиной стенки S = 0,75 мм. Длины обрезаемых припусков были выбраны фиксированными и составили 6, 10, 15, 25 мм. При значениях A = 6 мм и A = 10 мм обрезаемый припуск был короче половины длины рабочей зоны индуктора (A < 1/2) и оставлял со стороны торца заготовки неэкранированные витки. Для случая A = 15 мм выполнялось условие $A \approx 1/2$, а для A = 25 мм - A > 1/2. В результате предварительных экспериментов был определен минимальный уровень энергии разряда конденсаторной батареи магнитно-импульсной установки, необходимый для полного разделения заготовки $W_{min} = 3,0$ кДж. При данной энергии разряда проводи-



Рис. 1. Схема технологической оснастки а - исходное состояние; б - конечное. 1 - кронитейн; 2 - дистанционная втулка; 3 режущая матрица; 4 - заготовка; 5 - индуктор; 6 - отделившийся припуск

лась фоторегистрация процессов обрезки припуска при всех выбранных значениях А. Кроме того, для случая А = 10 мм были получены кинограммы при энергиях разряда

И

 $W_1 \approx 1,5 W_{min} = 4,4$ кДж

 $W_2 \approx 2 W_{min} = 5,9$ кДж.

Фоторегистрация процессов осуществлялась с помощью установки ВФУ-1 в режиме покадровой съемки в проходящем свете в направлении перпендикулярном оси заготовки. Для фиксации на пленке момента начала процесса деформирования в кадр вводился разрядный промежуток блока «метки времени». Для сопоставления кинограмм с параметрами нагружения одновременно с киносъемкой на экране осциллографа фиксировался ток разряда, протекающий через индуктор. Обработка кинограмм осуществлялась с помощью инструментального микроскопа.

В таблице приведены фрагменты кинограмм процессов обрезки припуска. Анализ кинограмм и графиков перемещения (рис.2), полученных в результате их обработки, по-



Рис.2. Положение образующей обрезаемого припуска в характерные моменты времени t. (Числовые значения параметра t на графиках указаны в микросекундах)

а - А = 10 мм, W = 3,0 кДж; b - А = 10 мм, W = 4,4 кДж; c - А = 10 мм, W = 5,8 кДж; d - А = 6 мм, W = 3,0 кДж; e - A = 15 мм; W = 3,0 кДж; f - А = 25 мм, W = 3,0 кДжс зволил выявить основные стадии процесса: деформирование припуска, разделение заготовки, дальнейшая деформация и разрушение обрезанного припуска.

При обрезке припуска длиной А = 10 мм при энергии разряда W = 3,0 кДж (рис. 2a) заметная деформация наблюдается по прошествии 9 мкс. До разделения заготовки обрезаемый припуск приобретает форму плавно выпуклого фланца, то есть наблюдается его поворот вокруг режущей кромки. В момент времени t = 15,9 мкс происходит отделение припуска от заготовки. Отделившийся припуск свободно деформируется до полного прилегания к торцевой поверхности режущей матрицы (t = 36,4 мкс). После удара о матрицу припуск отскакивает от нее и приобретает форму плоского кольца (t = 56,9 мкс), которая сохраняется до окончания силового воздействия. В дальнейшем для удобства описания и сравнения различных результатов фоторегистрации данный вариант процесса принят за базовый.

При увеличении энергии разряда до W=4,4 кДж и далее до W = 5,8 кДж начальные стадии базового варианта сохраняются (рис.2b, 2c). Однако, деформация идет более интенсивно. Отделение припуска происходит в моменты времени t = 6,8 мкс при W=4,4 кДж и t = 5,1 мкс при W = 5,8 кДж. Кроме того, до разделения заготовки большая часть образующей припуска остается не искаженной, то есть происходит деформация "из цилиндра в цилиндр". Искривления образующей наблюдаются только у режущей кромки и у свободного края. После разделения заготовки еще до удара о матрицу отделившийся припуск начинает разрушаться из-за возникновения трещин на торце, обращенном к режущей кромке. После удара о матрицу трещины развиваются на обоих торцах, что приводит к полному разрушению обрезанного припуска на отдельные фрагменты.

Процесс обрезки припуска длиной A=6 мм при W = 3,0 кДж происходит с сохранением всех стадий, характерных для базового варианты (рис.2,d,). Разделение заготовки происходит по прошествии 13,7 мкс.

Увеличение параметра A до 15 мм (рис.2е) при неизменной энергии разряда

W = 3,0 кДж приводит к меньшему изгибу образующей припуска на начальной стадии процесса и сокращению времени, необходимого для отделения припуска по сравнению с базовым вариантом (t = 15 мкс). В дальнейшем форма образующей имеет большую кривизну за счет отставания свободного края припуска. Кроме того, обрезанный припуск разрушается еще до контакта его с матрицей.

Значительно изменяется кинематика процесса при увеличении параметра A до 25 мм (рис.2f). Свободный край припуска длительное время остается невовлеченным в процесс деформации. После разделения заготовки (t = 11,4 мкс) на поверхности отделившегося припуска возникают продольные трещины (t = 25,0 мкc). В своем развитии трещины выходят на торцевые поверхности, что приводит к полному разрушению припуска (t = 47,7 мкc).

Сопоставление результатов фоторегистрации с временными параметрами токовых кривых показало следующее:

- все стадии процессов магнитно-импульсной обрезки припуска для всех рассмотренных случаев протекают в течение одного периода разрядного тока Т (Т≈75 мкс для всех значений W), то есть при активном действии давления импульсного магнитного поля;

 отделение припуска происходит еще до достижения током разряда первого максимума.

Поведение металла в очаге деформации изучалось с привлечением методов металлографического анализа. На макрошлифах, изготовленных из фрагментов образцов максимально приближенных к зоне полного разделения, полученных при условии W < W min, были выявлены линии течения металла. На рис.3 приведены характерные фотографии очага деформации: а - при величине припуска A=10 мм (A < l/2), б - A = 25 мм (A > l/2). На фотографиях шлифов наблюдаются значительные искажения линий течения материала заготовки, что свидетельствует об интенсивных нагрузках не только в радиальном направлении и сложном, меняющемся во времени, напряженно-деформированном состоянии материала в очаге деформации.

На основании экспериментальных ис-



Рис. 3. Характер течения материала заготовки при обрезке припуска энергией W < W min a - A = 10 мм; б - A = 25 мм. 1 - положение режущей кромки матрицы

следований предлагается следующая модель поведения металла в очаге деформации при магнитно-импульсной обрезке припуска, для пояснения которой на рис.4 приведены основные характерные стадии процесса разделения.

В начальный момент времени на материал заготовки действуют радиальные P_r и, в случае наличия неэкранированных заготовкой витков индуктора (A < 1/2), осевые нагрузки P_1 (рис.4а). При взаимодействии с острой режущей кромкой матрицы под действием сдвиговых, растягивающих окружных и сжимающих осевых напряжений в материале заготовки может возникнуть и распространиться вглубь от режущей кромки трещина. Происходит надрез заготовки на некоторую величину ΔS .



Рис.4. Стадии процесса магнитно-импульсной обрезки припуска а - надрез заготовки, зарождение наружной трещины; b - изгиб (поворот) припуска; с дальнейший изгиб (поворот) припуска, зарождение внутренней трещины; d - слияние трещин, разделение заготовки. l - направление течения металла

Далее на картину напряженно-деформированного состояния накладываются изгибные напряжения, возникающие за счет изгиба (поворота) припуска вокруг режущей кромки матрицы (рис 4b). Наружные волокна трубы при этом испытывают деформации сжатия, что осложняет развитие зародившейся наружной трещины. Кроме того, возможный контакт выступа, образовавшегося при надрезе заготовки, с торцевой поверхностью матрицы, может привести к пластическому деформированию объема металла ΔV (рис.4с). Дополнительное течение металла, в том числе и по направлению к режущей кромке, также препятствует развитию наружной трещины.

Внутренние волокна заготовки при повороте припуска растягиваются, металл утоняется, образуя утяжку. При превышении значения предельной деформации растяжения, например δ , на внутренней поверхности заготовки возникает трещина, распространяющаяся навстречу трещине, зародившейся на наружной поверхности (рис.4с). При слиянии обеих трещин происходит разделение заготовки (рис.4d). Данная картина поведения материала в очаге деформации характерна для случаев деформирования, приближающихся к базовому варианту (A=10мм, W= 3,0 кДж).

Процессы сдвига, осевого сжатия и изгиба, протекая одновременно, усложняют процесс течения металла, образования и распространения трещин. Так, при определенном соотношении напряжений, наружная



Рис. 5. Результаты численного моделирования процесса обрезки припуска a - t = 4,2 мкс; б - t = 8,4 мкс; в - t = 12,2 мкс; г - t = 14,0 мкс



Рис. 6. Вид поверхности разделения после магнитно-импульсной обрезки припуска. а - с положительным значением угла наклона линии разрушения; б - с отрицательным

трещина может вообще не зародиться или весьма быстро прекратить свое развитие. В этом случае разделение заготовки почти целиком осуществляется за счет запредельного растяжения внутренних волокон трубы. При интенсивной нагрузке изгиб припуска может значительно запаздывать, то есть наступать после распространения надреза почти на всю толщину стенки заготовки (варианты процесса при A=10 мм, W = 4,4 кДж и W = 5,9 кДж).

Увеличение длины припуска до значений A = 1/2 и A > 1/2 изменяет схему приложения нагрузки. При отсутствии осевых составляющих давления разделение заготовки происходит, в основном, за счет сдвиговых и растягивающих осевых напряжений (варианты процесса A = 15 мм и A = 25 мм при W = 3,0 кДж).

Приведенная модель поведения материала в очаге деформации хорошо согласуется с данными, полученными с помощью математического моделирования, основанного на вариационных принципах механики и модифицированного метода конечных элементов [4, 5, 6]. На рис.5 в качестве примера представлены результаты расчета процесса обрезки припуска при условиях: A > 1/2, W = W min. Затемненными участками отмечены конечные элементы, разрушившиеся к данному моменту времени t.

Процессы, протекающие в очаге деформации, во многом определяют геометрию поверхности разделения готовых деталей, оценка которой производилась на макрошлифах, изготовленных из образцов, полученных при изучении кинематики (рис.6).

Количественно вид поверхности разделения может быть охарактеризован тремя



Рис. 7. Параметры, характеризующие поверхность разделения 1 - зона пластических деформаций; 2 - зона разрушения

относительными геометрическими критериями [7]:

 $Ky = hy/S; K_1 = ly/S - коэффициенты вер$ тикальной и горизонтальной утяжек соответ $ственно; <math>K = tg \beta$ - коэффициент угла наклона линий разрушения, где hy, ly - высота и ширина зоны пластической деформации; β - угол наклона линии разрушения; S - толщина стенки трубчатого образца (рис.7).

При оценке поверхности разделения замер линейных и угловых размеров производился с помощью инструментального микроскопа.

Установлено, что для образцов, полученных при соотношениях A < l/2, W = W min, характерны отрицательные значения коэффициента угла наклона линии разрушения: K = -0,208 при A = 6 мм и $K_{\beta} = 0,219$ при $A^{\beta} = 10$ мм.

Увеличение энергии разряда при неизменной величине обрезаемого припуска (A=10 мм) приводит к уменьшению значений коэффициента угла наклона линии разрушения по абсолютной величине: $K\beta = -0,047$ при W = 4,4 кДж и $K\beta = 0$ при W = 5,8 кДж. Такая зависимость обусловлена более быстрым слиянием наружной и внутренней трещин при повышении интенсивности нагружения.

Величины коэффициентов утяжек мало зависят от скорости деформирования и для рассмотренных выше случаев находятся в пределах:

 $Ky = 0,41 \dots 0,56; K_1 = 0,85 \dots 1,16.$

Изменение схемы приложения нагрузки за счет увеличения длины припуска $A \ge 1/2$ при W = W min вызывает рост коэффициента K до значений 0,212 и 0,375 при A = 15 мм и A^{β} = 25 мм соответственно. Тенденция к снижению абсолютной величины коэффициента угла наклона линии разрушения с повышением скорости деформирования сохраняется и при данных соотношениях A и l/2, что было установлено в результате дополнительных экспериментов.

Следует отметить, что с увеличением длины обрезаемого припуска существенно уменьшаются коэффициенты вертикальной и горизонтальной утяжек до значений $Ky = 0.22 \dots 0.27$ и $K_1 = 0.53 \dots 0.55$.

За критерии качества деталей, полученных с помощью операций обрезки припуска, кроме геометрии поверхности разделения были приняты следующие параметры: шероховатость поверхности разделения, торцевое биение и точность калибровки концевых участков, наличие или отсутствие микротрещин в зоне реза.

Установлено, что при изменении технологических параметров процесса в исследуемом диапазоне достижимы следующие показатели. Шероховатость поверхности разделения, измеренная в зоне разрушения образцов с помощью профилографа - профилометра, составляет Ra 3,2 ... Ra 6,3. Торцевое биение не превышает 0,2 мм. Точность калибровки концевых участков деталей, прилегающих к линии реза, на длине не менее 10 мм соответствует 11 квалитету. Люминесцентный контроль зоны реза показал отсутствие микротрещин.

Таким образом, достигнутые показатели качества соответствуют требованиям, предъявляемым к деталям, подвергаемым последующей сварке встык как в ручном, так и в автоматическом режимах.

Проведенные экспериментальные исследования, результаты их обработки и высказанная модель поведения металла в очаге деформации позволяют осознанно управлять

А, мм	W, кДж	Положение образующей обрезаемого припуска в характерные моменты времени t, мкс							
10	3,0	0	9,1	15,9	30,0	36,4	56,0		
		0	8,4	13,5	18,6	25,3	40,5		
10	4,4	100			4	Ň			
		0	5,1	13,5	16,9	23,6	40,5		
10	5,8		894 C 220484						
		0	11,4	15,9	18,2	22,8	43,2		
6	3,0								
		0	9,1	18,2	22,8	31,9	43,2		
15	3,0					6	151		
		0	11,4	22,7	27,3	43,2	63,6		
25	3,0						R		

Таблица. Фрагменты кинограмм процессов обрезки припуска

процессом резки с целью получения требуемого качества готовых деталей, разработать обоснованные рекомендации по проектированию технологических процессов и оснастки. Знание характера поведения отделившегося припуска позволяет предусмотреть меры защиты работающего персонала от возможного разлета осколков разрушающегося отхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Обрезка припуска у полых деталей импульсным магнитным полем / А.Е. Бурмистров, Л.Ф. Фомичева, В.А. Глущенков и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 7.
- 2. *Бурмистров А.Е.* Возможности магнитноимпульсной резки труб //Новые технологические процессы магнитно-импульсной обработки, оборудование и инструмент. Куйбышев: КуАИ, 1990.
- 3. Хаустов Е.М., Пахотин А.Н. Методика регистрации перемещения образующей оболочки при совмещенных операциях магнитно-импульсной обработки металлов / Омский политех. ин-т. Деп. в ВИ-НИТИ 02.08.89. № 5202-В89.

- Численное исследование процессов высокоскоростного деформирования металлов на основе метода конечных элементов / В.А. Глущенков, И.Е. Гончаренко, Г.З. Исарович и др. // Машиноведение. 1986. № 4.
- 5. Численное моделирование и исследование магнитно-импульсной обработки трубчатых заготовок при изготовлении неосесимметричных деталей / В.А.Глуиценков, С.А.Стукалов, И.Е.Гончаренко и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. № 4.
- The progress of zone of Destruction in the time of magnetic-impulse cutting of tubes / *V.N.Kislooky, V.G.Kobiev, S.A.Poteshkin a.a.* //Fracture mechanics: successes and problems ICF-8. Kiev. 1993.

MAGNETIC-IMPULSE TUBES CUTTUNG. THE MECHANISM. QUALITY

© 2000 V.A. Gluschenkov¹, A.E. Burmistrov²

¹Volga Branch of Institute of Metallurgy and Materials named for A.A. Baikov of Russian Academy of Sciences, Samara ²Samara State Aerospace University

The mechanism of separation of tubular part blanks is considered at magnetic-impulse loading. The kinematics of separation process is researched at different conditions of loading and relations of geometrical parameters of part blank, inductor, matrix. With taking into consideration of metallography researches the model of behaviour of metal in the center of a strain is offered, which one allows is justified to control the process with the purpose of reaching demanded quality of details.

УДК 621.77.044.7.011

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ЗАДАННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ

© 2000 В.А. Барвинок, В.П. Самохвалов, А.Н. Кирилин, С.М. Олексийко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Представлена методика выбора режимов технологических процессов магнитно-импульсной обработки деталей с учетом заданных свойств материала. Методика основана на проектировании технологических процессов с применением математической модели, описывающей напряженно-деформированное состояние материала детали.

Развитие машиностроения требует решения большого числа разнообразных задач, в числе которых одной из проблемных является обеспечение заданного ресурса эксплуатации изделий за счет повышения качества их изготовления. Применительно к производству летательных аппаратов эти задачи решаются на нескольких уровнях, одним из которых является изготовление деталей с контролируемыми геометрическими размерами и заданными свойствами материала.

В процессе обработки пластическую деформацию ограничивают такие явления, как потеря устойчивости, образование шейки, растрескивание или комбинация этих явлений. На данном этапе задача управления свойствами решается на базе использования различных схем энергетического воздействия на заготовку, с помощью которых удается интенсифицировать процесс пластического течения металла.

Факторы, посредством которых можно интенсифицировать процесс пластического течения, по характеру их воздействия можно разделить на следующие два класса:

1. Факторы, приводящие к изменению физико-механических свойств обрабатываемого материала (термическое, магнитно- и электроимпульсное воздействие и т.п.).

2. Факторы, изменяющие энергосиловую схему деформационного процесса (силовая интенсификация, совмещение операций, локальное нагружение, активное использование или, напротив, исключение действия сил контактного трения и т.д.). Одной из наиболее перспективных технологий динамической штамповки деталей в настоящее время является магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ), основанная на использовании больших электродинамических сил, возникающих в электропроводных материалах при взаимодействии внешнего импульсного магнитного поля (ИМП) с индуцированными им в материале вихревыми токами.

Магнитно-импульсное деформирование характеризуется воздействием на материал нестационарных магнитных полей напряженностью до (2...3)· 10⁷ А/м и импульсных токов до 5. 10⁵ А и обусловленным этим магнитно-импульсным воздействием (МИВ) и импульсным нагревом металла в процессе деформирования заготовки. В этих условиях значительно изменяются физико-механические свойства металлов и сплавов, МИВ накладывает отпечаток на сам механизм пластического течения. Магнитно-импульсное воздействие является постоянным сопутствующим фактором процессов магнитно-импульсной штамповки (за исключением случаев применения спутников), что обуславливает высокие предельные возможности метода.

Одним из направлений расширения технологических возможностей МИОМ является обеспечение возможности обработки заготовок из материалов с низкой электропроводностью: коррозионно-стойких и специальных сталей, титановых сплавов и т.п., составляющих значительную часть номенклатуры тонколистовых и трубчатых деталей летательных аппаратов (до 20%) и других изделий машиностроительного производства. Вследствие сильной диффузии поля их обработка непосредственным воздействием ИМП возможна практически только при высоких частотах. При этом общий КПД процесса крайне низок, в связи с малой длительностью импульса давления, часто недостаточной для преодоления инерции заготовки. Эффективным средством интенсификации процессов магнитно-импульсной обработки этих материалов является штамповка с использованием передающих сред или технологических спутников.

Следует отметить, что на точностные характеристики деталей и характер напряженного состояния материала при магнитно-импульсной обработке оказывает влияние большое число факторов: энергия разряда; частота разрядного тока; степень деформации заготовки, оснастки, спутника; температура нагрева заготовки и т.д. В связи с этим при решении задачи оптимизации точностных параметров и задания определенных свойств материала деталей необходимо использовать аппарат математического моделирования технологических процессов.

С другой стороны, использование сложного математического аппарата для решения вопросов, связанных с построением математической модели, учитывающей сложные особенности поведения материалов, которые проявляются в условиях конечных деформаций, существенных скоростей нагружения, высоких температур, сложных траекторий, должно быть обосновано практической эффективностью.

Для технологического обеспечения высокой точности получаемых деталей необходимы математические модели, базирующиеся на современных положениях механики сплошных сред, обладающие алгоритмичностью и хорошей гибкостью, что особенно важно при описании динамики и граничных условий исследуемого процесса.

Для процессов магнитно-импульсной обработки развитие математического моделирования технологического процесса происходит в основном в следующих направлениях: · расширение содержания математической постановки задач;

 более корректный учет всех факторов и физических эффектов, сопровождающих процесс магнитно-импульсного деформирования;

· совершенствование и разработка новых методов решения задач.

В настоящее время известно несколько сотен пакетов прикладных программ расчета упругопластического деформирования тонколистовых и трубчатых деталей, которые позволяют в той или иной мере реализовывать возможность динамических расчетов. Естественно возникает вопрос пригодности программного продукта для расчета параметров конкретных технологических процессов магнитно-импульсной обработки.

Основа любого метода определяется исходной постановкой математической задачи. Для вышеуказанных процессов это уравнения многомерных течений упругопластических сред с конечными деформациями и учетом нестационарной деформации магнитного поля, волновых процессов, динамического трения и контактного взаимодействия с технологической оснасткой и инструментом.

Анализ многочисленных работ показывает, что для разработки технологических процессов магнитно-импульсного деформирования с учетом управления свойствами материала детали наиболее приемлемыми являются численные методы математического моделирования.

В общем случае постановку задачи можно представить следующим образом. Пусть Y(x,t) – вектор параметров и кинематики точек заготовки в момент времени t для пространственного вектора x, а D – вектор исходных данных, определяющих конкретную технологию и параметры импульсного нагружения. Математическую постановку задачи высокоскоростного деформирования заготовки можно задать некоторым, в общем случае, нелинейным оператором A. Для классической постановки задачи в рамках механики сплошных сред, использующей законы сохранения в дифференциальной форме, запись задачи имеет вид:

$$A^{N}[Y(x,t),D] = 0.$$
 (1)

Постановку аналогичной задачи механики континуума на основе вариационных принципов определяет соотношение:

$$A^{\nu}[Y(x,t),D] = 0.$$
 (2)

Дискретизация задачи на конечномерное пространство приводит к двум основным классам численных методов: дифференциально-разностным и вариационно-разностным. Эти методы определяются конечномерной алгебраической постановкой задач

$$A_{h}^{N}[Y(x_{h},\tau),D_{h}]=0,$$
 (3)

$$A_{h}^{V}[Y(x_{h},\tau),D_{h}]=0.$$
 (4)

Здесь т - дискретное время; *h* – параметр пространственной дискретизации.

При этом исходной дифференциальной континуальной постановке (1) соответствует дифференциально-разностная постановка (3), а вариационной постановке (2) соответствует вариационно-разностная постановка (4). Различные процедуры дискретизации и получения на ЭВМ приближенных численных решений $Y(x_h, \tau)$ определяют широкий спектр известных и будущих численных методов.

Среди вариационно-разностных методов широко известен метод конечных элементов (МКЭ), характеризуемый тем, что минует стадию постановки краевой задачи механики сплошной среды. Сплошное тело сразу представляется в виде совокупности дискретных элементов. Вариационные принципы механики распространяются на совокупность этих элементов. Разработанные процедуры дискретизации и численного решения конечно-разностных задач (4), легкость описания сложных границ, хорошая устойчивость, доступность программных реализаций данного метода делают его популярным в инженерной среде. За счет хорошей устойчивости практически всегда удается получить некоторое достаточно гладкое решение исходной задачи. К недостаткам метода следует отнести недостаточную обоснованность вариационных принципов задач волновой механики, вопросов устойчивости и сходимости. Поэтому вопросы корректности численного решения при использовании МКЭ для расчета процессов МИОМ всегда актуальны.

Для расчета процессов МИОМ популярны варианты дифференциально-разностных численных методов, известных как сеточные. В них конечно-разностные уравнения (3) получаются аппроксимацией дифференциальных уравнений, описывающих исходную физическую постановку задач. При этом возможна явная или неявная аппроксимация в зависимости от того временного слоя, на котором ищется численное решение.

Явная разностная схема проста в построении и программной реализации, но может приводить к внесению значительных искажений в численное решение. Это особенно проявляется в случае, если нарушаются законы сохранения в отдельных ячейках сетки (неконсервативные разностные схемы). Наложение сеточных волн на решение наиболее сильно сказывается в задачах, где одновременно учитываются упругие и пластические волны. Например, это необходимо делать при расчете взаимодействия заготовки с матрицей. Скорость упругих волн на порядок выше скорости пластических волн и определяет условие устойчивости и величину шага интегрирования по времени. Шаг по времени получается с большим запасом по скорости пластических волн, что неблагоприятно сказывается на качестве численного решения. Одним из достоинств явных разностных схем является то, что ошибки в постановке задачи и проектировании численного алгоритма легче проявляются и позволяют их контролировать. Это и не исключает использование других способов оценки корректности численных решений.

Процессы высокоскоростного формоизменения тонколистовых материалов и труб при МИОМ, определяемые переходными волновыми процессами в нелинейных средах, описываются смешанными задачами математической физики для уравнений в частных производных гиперболического типа. Для таких задач в настоящее время нет общих теорем существования и единственности, что по сути требует индивидуального подхода к постановке, численному решению и анализу полученных результатов. Процедура численного решения при использовании любого метода может внести эффекты, недопустимые с точки зрения последующего технологического применения результатов расчета. При применении одних численных методов это могут быть искусственно внесенные волновые эффекты, а при других – смазывание реально существующих.

С учетом вышеприведенных замечаний, разработка технологических процессов деформирования трубчатых заготовок из высокоэлектропроводных и труднодеформируемых материалов была выполнена по разработанной математической модели на основе вариационного принципа Гамильтона [1]

$$\delta T = \int_{t_0}^{t_1} (\delta \mathcal{P} - \delta K) dt - \int_{t_0}^{t_1} \delta A dt = 0$$

где $\delta \mathcal{F}$ - вариация работы внешних сил; δK - вариация кинетической энергии; δA - вариации работы внутренних сил.

При дискретизации деформационного процесса по времени, а объема континуума – конечными элементами и подстановки разрешающих функций для скоростей перемещений $u^{a'}$ через перемещения $U^{a'}_{(S_1+S_2)}$ точек конечного элемента (рис.1)

$$u^{a'} = \sum_{S_1} \sum_{S_2} U^{a'}_{(S_1 + S_2)} \cdot \left(S_1 x_1 + \frac{1}{2}\right) \cdot \left(S_2 x_2 + \frac{1}{2}\right)$$

Задача сводится к решению матричных уравнений движения на *n*-ном шаге по времени

$$[M]{U}^{(n)} + {R}^{(n)} + {Q}^{(n)} = 0,$$

где [M] - диагональная матрица масс;





$$\{U\}, \{R\}, \{Q\}$$

- матрицы-столбцы узловых ус-

В процессе деформирования происходят большие перемещения заготовки, поэтому значительное внимание уделяется удовлетворению условия смещения конечного элемента (КЭ) как жесткого целого. Это осуществляется на основе моментной схемы конечного элемента [3], где кроме обычного представления выбранных разрушающих функций (6) производится разложение скоростей в ряд Маклорена, в котором удерживаются два первых члена [7] с ограничениями.

Решение уравнения движения производится по явной разностной схеме сквозного счета. Метрические характеристики КЭ пересчитываются на каждом шаге, что в целом позволяет учесть геометрическую нелинейность задачи. Учет физической нелинейности производится путем корректировки на каждом шаге девиаторной части полных напряжений согласно принятому условию Мизеса на основе постулата Друккера. При определении шаровой части тензора полных напряжений учитывается искусственная вязкость, которая вводится для обеспечения непрерывности функций напряжений при прохождении ударных волн через КЭ. Устойчивость решений обеспечивается выбором шага по времени согласно критерию Куранта [7].

Численная математическая модель позволяет моделировать процессы деформирования листовых и трубчатых заготовок воздействием давлений ИМП в осесимметричной постановке, а также процессы деформирования одно- и многослойных заготовок (например, штамповка со спутником) по податливой оснастке в плоской постановке, с учетом объемного характера электромагнитных сил в заготовке.

В математической модели использован принцип фрагментации, который в данном случае позволяет применять прием передачи реакции от одного блокфрагмента деформируемой системы "спутник – заготовка – оснастка" на другой при условно принятом бесконечно малом зазоре между ними.

Общий алгоритм решения задачи сформирован в соответствии с общей схемой технологического процесса. После первого нагружения заготовки могут быть сформулированы второй и третий переходы ее формовки с другими начальными распределениями нагрузки и другой энергией разряда. В случае многопереходной формовки может быть смоделирован отжиг заготовки, при этом во всех конечных элементах начальные напряжения и остаточные деформации считаются равными нулю.

Давление импульсного магнитного поля на заготовку определялось по формуле

$$P = P_0 e^{-2\delta t} \sin^2 \omega t , \qquad (8)$$

где P_0 – давление ИМП в первый полупериод тока разряда; δ - декремент затухания тока разряда; t – время тока разряда; ω - круговая частота тока разряда.

Соотношение между механическими и электромагнитными полями в процессе деформирования представлялись в виде:

$$-\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V} W dV = \iint_{\Sigma} \overline{S}_{n} d\overline{\Sigma} + \\ + \iiint_{V} \left(\rho Q_{\mathcal{A}\mathcal{K}} - B^{\mathcal{K}\mathcal{I}} \cdot \dot{\mathcal{B}}_{\mathcal{K}\mathcal{I}} \right) dV, \qquad (9)$$

где V - объем деформируемого тела; Σ - поверхность деформируемой заготовки; B - классическая магнитная индукция; ρ - массовая плотность; Q - количество тепла от джоулева нагрева; W - плотность магнитной энергии на единицу объема; $\dot{\mathcal{G}}_{K\Pi}$ - скорость тензора деформаций; S - вектор работы механических напряжений в единицу времени в *n*-ом конечном элементе.

Уравнения динамической термопластичности, устанавливающие связь между высокими температурами и механическими свойствами материала, будут иметь следующий вид:

 для температуры нагрева материала в зависимости от величины магнитной индукции

$$T = T_0 + \frac{2}{\rho c_V^{CP}} W + \frac{\alpha_T}{\alpha_g} \cdot \widetilde{T} , \qquad (10)$$

где α_{T} - коэффициент тепловой диффузии; $W = 0.5B^{2}/\mu_{0}$; *B* - магнитная индукция; c_{v} удельная теплоемкость при постоянной деформации; $\alpha_{g} = 1/\sigma_{\mu}$ - коэффициент магнитной индукции; σ_0 - электропроводимость материала;

• для условия пластической текучести

$$(\sigma_{ik} - \rho_{ik})(\sigma^{ik} - \rho^{ik}) \leq \frac{2}{3}\sigma_T^2(T, j_e), \quad (11)$$

где ρ_{ik} - тензор остаточных микронапряжений, характеризующий трансляционный сдвиг поверхности текучести; σ_{T} - динамический предел текучести; j_{e} - второй инвариант тензора скорости девиатора деформаций

$$j_e = \sqrt{2/3\varepsilon_{ik}\varepsilon^{ik}}, \qquad (12)$$

ε_{ik} - тензор скорости пластических деформаций; σ_{ik} - шаровая составляющая тензора полных напряжений.

Описанная методика и алгоритмы были реализованы в виде пакета прикладных программ для базовых схем процессов. Для деталей простейших геометрических форм, таких как цилиндр, конус, кольцевой рифт, на базе упрощенных зависимостей разработана инженерная методика расчета параметров технологического процесса, реализованная как в виде программы для ЭВМ, так и в виде номограмм.

Отработка проектируемых технологических процессов проведена на Самарском заводе "Прогресс", где освоено и внедрено в производство более 200 наименований промышленных деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, коррозионно-стойких и специальных сталей и сплавов типа жесткостей, окантовок, корпусов, полупатрубков, переходников и др. из номенклатуры деталей каркаса ЛА. В освоенную номенклатуру вошли детали малых и средних размеров (от 40 до 1000 мм), довольно сложные по форме и конструкции. Изготавливаются эти детали с помощью операций гибки, отбортовки отверстий и наружных контуров различной формы, калибровки, формовки рифтов и т.п. Точность откалиброванных деталей соответствует 7-9 квалитету.

На заводе "Прогресс" совместно с Самарским государственным аэрокосмическим университетом проведены комплексные работы по созданию, исследованию и освоению технологических процессов прецизионной магнитно-импульсной калибровки тонкостенных оболочек. Полученные результаты были использованы при разработке технологического процесса прецизионной калибровки поясков сильфонов из сплава 08Х18Н10Т. Калибровка производилась при использовании индуктора с концентратором магнитного поля. В качестве спутника использовалась алюминиевая фольга толщиной 0,15 мм, наматываемая в 4-6 слоев. При энергии заряда магнитно-импульсной установки МИУ-20/1, равной 2,3 кДж, был обеспечен разброс значений среднего диаметра не более 0,03 мм при овальности деталей не более 0,05 мм.

Высокие технологические возможности магнитно-импульсной формовки-калибровки были подтверждены при обработке концевых участков трубчатых деталей из сплава ЭП-810ВД ($S_{0,2}$ =800 МПа) по схеме на обжим. Полученные детали имели отклонение размеров от номинала не более 0,1 мм.

Таким образом, предложенная методика позволяет выбирать такие режимы технологических процессов, которые обеспечивают не только гарантированную точность деталей, но также и заданные свойства материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Барвинок В.А., Самохвалов В.П., Родин Н.П., Кирилин А.Н. Расчет и моделирование процессов магнитно-импульсной формовки тонкостенных оболочек // Машиностроение и автоматизация. 1997. №1-2.
- 2. Барвинок В.А., Самохвалов В.П., Кирилин А.Н. Выбор математической модели технологического процесса магнитно-импульсной обработки // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1999. №4.
- 3. Шапошников Н.Н., Римский Р.А., Полто-

рак Г.В., Бабаев В.Б. Применение метода конечных элементов к решению динамических задач // Расчет на прочность. 1983. Вып.23.

- 4. Горлач Б.А. Математическая модель технологических процессов формообразования неупругих тел // Авиационная техника. 1992. №4.
- 5. *Кухарь В.Д., Пасько А.Н.* Динамическая модель упругопластического деформирования твердых тел // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства. Тула: ТулГУ, 1994.
- Одиноков В.И. Численные исследования процесса деформации металла бескоординатным методом. Владивосток: Дальнаука, 1995.
- Кислоокий В.К., Сахаров А.С. Численная реализация задач динамики нагруженных пластин и оболочек // Материалы научной школы по проблеме "Динамические задачи пластических пластин и оболочек". Тарту. 1974.
- Баженов В.Г., Кочетков А.В., Михайлов Г.С. Численное решение плоских и осесимметричных задач взаимодействия упругопластических оболочек с ударными волнами // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Горький: ГГУ, 1977. Вып.7.
- Власов А.В., Курдюк С.А., Шмелев Е.Н. Использование программного комплекса PRADIS для моделирования технологических комплексов обработки давлением. // Материалы Всероссийской юбилейной научно-технической конференции "Оборудование и процессы обработки давлением". М. 1995.

THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY MAGNETIC-IMPULSE DEFORMATION WITH TAKING INTO CONSIDERATION GIVEN PROPERTIES OF PART MATERIAL

© 2000 V.A. Barvinok, V.P. Samokhvalov, A.N. Kirilin, S.M. Oleksiyko

Samara State Aerospace University

The technique of conditions choice of mode of operation for magnetic - impulse handling of parts with taking into consideration given properties of a material represented. The technique based on technology designing with application of a mathematical model circumscribing stress-strain state of a material in part.