

УДК 621.81.004.17:620.191.355.001.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ  
ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ ПРИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕД.Б. Леонов<sup>a, b</sup>, С.Д. Васильков<sup>a</sup>, А.Ю. Иванов<sup>a</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, dimilqn@mail.ru<sup>b</sup> ВМЗ АО Сопот, Сопот, Болгария, dimilqn@mail.ru

Рассматриваются проблемы ротационной вытяжки трубных или листовых заготовок из алюминий-магниевого и алюминий-магниевого деформируемых сплавов. Обосновывается необходимость контроля распределения технологических остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок в процессе ротационной вытяжки. Исследуется деталь из алюминий-магниевого сплава АМг5, получаемая трехэтапной ротационной вытяжкой. Остаточные напряжения  $\sigma$  определялись резистивным электроконтактным методом. Выполнен анализ напряженного состояния заготовок после каждого этапа ротационной вытяжки. С применением теории планирования эксперимента проведены исследования влияния режимов обработки и термообработки на уровень остаточных напряжений в материале заготовок. Параметром оптимизации процесса принята величина остаточных напряжений, а факторами процесса – технологические режимы ротационной вытяжки и межэтапной термообработки. На основе статистического расчета представлена математическая модель процесса (по критерию Фишера). Получены технологические режимы обработки, при которых обеспечивается наименьший уровень остаточных напряжений в поверхностном слое исследуемых образцов и оптимальное распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок. Разработанная методика может быть рекомендована для применения в производственных условиях при изготовлении осесимметричных деталей из алюминий-магниевого и алюминий-магниевого деформируемых сплавов методом ротационной вытяжки.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, ротационная вытяжка, неразрушающий резистивный электроконтактный метод, теория планирования эксперимента.

STRESS STATE STUDY FOR PARTS OF ALUMINIUM-MAGNESIUM AND  
ALUMINIUM WROUGHT ALLOYS AT ROTARY SPINNINGD.B. Leonov<sup>a, b</sup>, S.D. Vasilkov<sup>a</sup>, A.Yu. Ivanov<sup>a</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, Russia, dimilqn@mail.ru<sup>b</sup> "VMZ" Co, Sopot, Bulgaria, dimilqn@mail.ru

The paper deals with the problems of rotary spinning of pipe or sheet workpieces made of aluminium-magnesium and aluminium wrought alloys. The need to control depth distribution of internal stresses in the workpiece surface layer in the rotary spinning process is determined. An Al-Mg5 aluminum alloy part is researched, which is obtained after 3 - stage rotary spinning. By the use of non-destructive resistance electric contact method, measurements and analysis of the stressed state for the workpieces after each stage of rotary spinning are made. According to the experiment planning theory, research of the influence of processing and thermal treatment modes on the levels of residual stresses  $\sigma$  in the workpieces material is conducted. The value of the residual stresses is assumed as an optimization parameter, and the technological modes of spinning and the modes of the thermal treatment applied between the rotary spinning stages - as factors of the process. Statistical estimation is made, which makes it possible to obtain an adequate mathematical model (estimated by the Fisher's criterion) describing the relation between the optimization parameter and the optimization factors. Technological processing modes with the lowest level of residual stresses in the surface layer of the researched samples and the optimal depth distribution of residual stresses in the workpiece surface layer are obtained. Developed method is applicable in all operating conditions for parts manufacturing of different geometry and different materials.

**Keywords:** residual stresses, rotary spinning, nondestructive resistance electric-contact method, experiment planning theory.

## Введение

В различных отраслях промышленности [1] широкое распространение нашли осесимметричные детали, изготавливаемые ротационной вытяжкой трубных или листовых заготовок из алюминий-магниевого и алюминий-магниевого деформируемых сплавов (рис. 1). Процесс ротационной вытяжки характеризуется локализацией деформации в небольшой зоне обрабатываемого металла, перемещение которой, вследствие вращения заготовки и подачи инструмента по заданным траекториям, приводит к необратимому изменению формы и получению нужного изделия. Ротационная вытяжка успешно конкурирует с механической обработкой по производительности и позволяет использовать более простые по форме и способу получения заготовки [2, 3].



Рис. 1. Детали, изготавливаемые ротационной вытяжкой

Технологическая операция изготовления деталей приборов из металлов и сплавов сопровождается накоплением или перераспределением остаточных напряжений, которые могут оказывать существенное влияние на эксплуатационные характеристики изделий. Причиной возникновения внутренних напряжений при ротационной вытяжке является наличие очага пластической деформации. Появление таких напряжений может привести к локальным деформациям и дефектам заготовки. Увеличение сжимающих напряжений может привести к гофрообразованию, а растягивающие напряжения могут привести к образованию окружных трещин [4]. Оба случая являются браковочными показателями изделий. Это обуславливает необходимость контроля распределения внутренних напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок в процессе проведения ротационной вытяжки. Для определения остаточных напряжений можно использовать как разрушающие методы (метод Давыденкова–Биргера, метод зондирующей лунки и др.) [5–7], так и неразрушающие методы (резистивный электроконтактный, магнитный, акустический, рентгеновский и др.) [8, 9]. Применение разрушающих методов позволит получить характер распределения напряжений по глубине поверхностного слоя изделий, но при этом придется разрушить заготовку или готовое изделие, поэтому применение неразрушающего метода предпочтительнее. В настоящей работе для определения механических остаточных напряжений поверхностного слоя деталей использован неразрушающий резистивный электроконтактный метод, основанный на корреляции между интегральными электрическими и механическими характеристиками металлов и сплавов – удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  в  $h$ -слое металла и механическими напряжениями [9, 10].

#### Исследуемый образец и постановка эксперимента

В качестве объекта исследования использована деталь из алюминиевого сплава АМг5, приведенная на рис. 2. В табл. 1, 2 приведены состав и основные свойства используемого материала АМг5 в соответствии с ГОСТ 21631-76 [11].

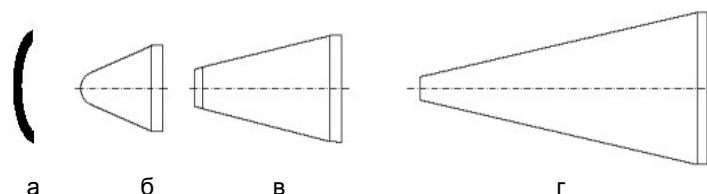


Рис. 2. Деталь из АМг5 диаметром 70 мм, полученная после трехэтапной ротационной вытяжки: исходная заготовка толщиной 6 мм (а); первый этап ротационной вытяжки (толщина стенки 2 мм, угол конуса 64°) (б); второй этап ротационной вытяжки (толщина стенки 1,2 мм, угол конуса 43°) (в); третий этап ротационной вытяжки (толщина стенки 0,8 мм, угол конуса 25°) (г)

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примеси
не более 0,5	не более 0,5	0,3–0,8	0,02–0,1	91,9–94,68	не более 0,1	0,0002–0,005	4,8–5,8	не более 0,2	не более 0,1

Таблица 1. Химический состав материала АМг5 (в процентах)

Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное удлинение $\Delta$ , %	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа	Удельное электрическое сопротивление $R \times 10^9$ , Ом·м
275	130	12–15	2650	71	64

Таблица 2. Механические и физические свойства материала АМг5 при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$

Технологический процесс обработки детали включает трехэтапную ротационную вытяжку, проводимую на двухроликовом станке модели LEIFELD ST-400. После проведения каждого этапа ротационной вытяжки заготовки подвергались низкотемпературному отжигу при температуре  $T = 350^\circ\text{C}$  для снятия

остаточных напряжений. На заключительном этапе изготовления детали механические и прочностные характеристики материала должны быть не ниже указанных в табл. 2.

С целью исследования влияния режимов вытяжки на остаточные напряжения в поверхностном слое заготовок из материала АМг5 был проведен эксперимент по следующему плану:

- измерение и анализ напряженного состояния заготовок резистивным электроконтактным методом после каждого этапа ротационной вытяжки;
- исследование влияния режимов обработки и термообработки на уровень остаточных напряжений в материале заготовок с применением теории планирования эксперимента;
- получение технологических режимов обработки, гарантирующих наименьшие остаточные напряжения в поверхностном слое заготовок.

### Методы исследования и результаты

Замеры напряжений проведены с использованием прибора СИТОН, работающего на принципе неразрушающего резистивного электроконтактного метода [9]. С целью получения более достоверных результатов перед началом измерения контролируемая поверхность на заготовках была обезжирена и высушена. Датчик поочередно устанавливался в трех местах под углом  $120^\circ$  на окружной поверхности каждой заготовки (зоны проведения замеров –  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ ).

Результаты измерений показаны на рис. 3. Глубина замеров и установка датчика предусмотрены методикой функционирования прибора СИТОН, который реализует неразрушающий резистивный электроконтактный метод измерения.

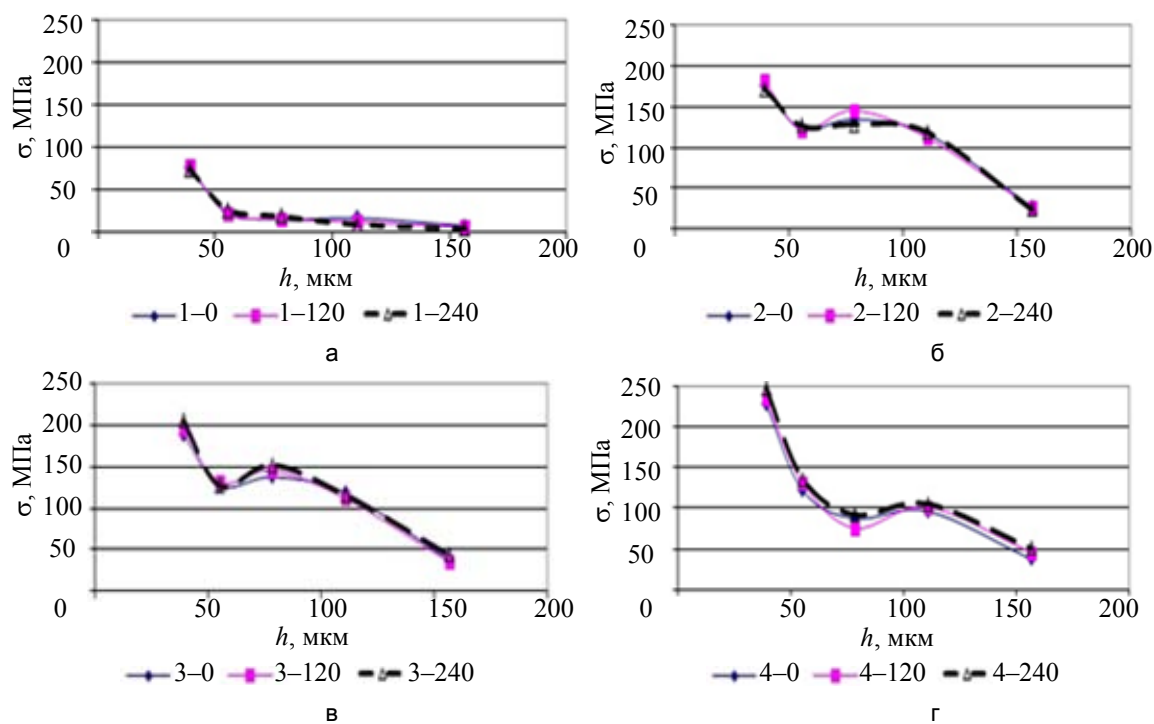


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок. Каждый график содержит три кривые, соответствующие зонам проведения замеров (в градусах) на поверхности заготовки: исходная заготовка (а); первый этап ротационной вытяжки (б); второй этап ротационной вытяжки (в); третий этап ротационной вытяжки (г)

Характер распределения напряжений на рис. 3 показывает, что они являются растягивающими. Видно, что после каждого этапа ротационной вытяжки, несмотря на проведенную термообработку, внутренние растягивающие напряжения увеличиваются. На последнем этапе ротационной вытяжки (рис. 3, г) внутренние напряжения близки к пределу прочности материала АМг5  $\sigma_b$  для данного материала (табл. 2). Это обуславливает необходимость исследования влияния технологических режимов обработки детали с целью уменьшения внутренних напряжений.

### Анализ полученных результатов

Анализ полученных результатов проведен с использованием теории планирования эксперимента [12]. Его целью было получение наименьшего уровня значений остаточных напряжений в поверхностном слое исследуемых заготовок при варьировании технологических режимов обработки и термообработки. Параметром оптимизации являлась величина остаточных напряжений  $\sigma$  (в расчете принимали макси-

мальную величину остаточных напряжений, измеряемых в поверхностном слое каждой заготовки). Факторами процесса приняты технологические режимы ротационной вытяжки и режимы проводимой термообработки после каждого перехода ротационной вытяжки (табл. 3). Уровни варьирования факторов выбранны исходя из технических возможностей использованного оборудования (LEIFELD ST-400) и результатов предварительных экспериментов [13, 14].

Фактор	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровень факторов		
			Нижний (-1)	Базовый (0)	Верхний (+1)
Продольная подача $S$ , мм/об	$X_1$	$\pm 0,39$	0,02	0,41	0,8
Обороты шпинделя $n$ , об/мин	$X_2$	$\pm 20$	780	800	820
Температура термообработки $T$ , °C	$X_3$	$\pm 20$	330	350	370

Таблица 3. Основные факторы и диапазоны их варьирования

Поскольку факторы процесса неоднородны и измеряются в различных единицах, а числа, выражающие величины факторов, имеют различные порядки, они были приведены к единой системе счисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным [12]:

$$\tilde{X}_i = \frac{X_i - X_{i\text{осн}}}{\Delta X_i},$$

где  $\tilde{X}_i$  – кодированное значение фактора;  $X_i$  – действительные значения фактора;  $X_{i\text{осн}}$  – значение фактора на основном уровне;  $\Delta X_i$  – интервал варьирования текущего фактора;  $i$  – номер фактора.

Проведенный статистический расчет позволил получить:

- адекватную математическую модель процесса (по критерию Фишера), описывающую связь между параметром и факторами оптимизации:  

$$\sigma = 207,3 + 13,75S - 3,2n - 5,8T + 2,1S \cdot n + 3,275n \cdot T + 2,75S \cdot n \cdot T;$$
- технологические режимы обработки, при которых обеспечивается наименьший уровень остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из материала АМг5, получаемых методом ротационной вытяжки (табл. 4);
- оптимальное распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок, обработанных при данных режимах (рис. 4).

Продольная подача $S$ , мм/об	Обороты шпинделя $n$ , об/мин	Температура термообработки $T$ , °C
0,21	815	360

Таблица 4. Технологические режимы обработки для получения наименьшего уровня остаточных напряжений в поверхностном слое образцов

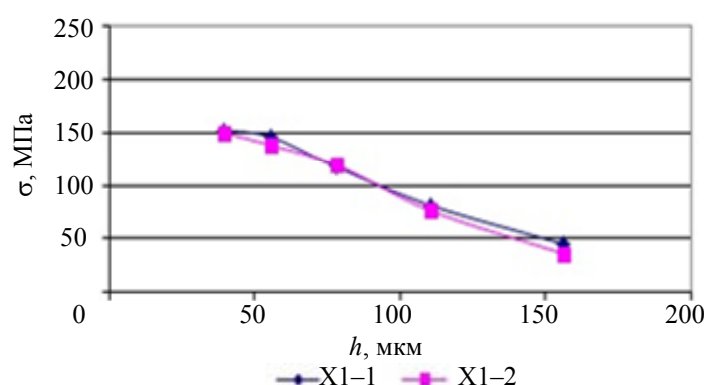


Рис. 4. Оптимальное распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок

Для проверки механических характеристик материала в конце исследования из заготовок, имеющих распределение остаточных напряжений, показанное на рис. 4, были вырезаны образцы согласно ГОСТ 1497-84 [15]. Испытания показали, что удлинение опытных образцов от момента начала текучести материала (при нагрузке 140 МПа) до момента разрыва образца (при нагрузке 290 МПа) составило 15%. Полученные результаты испытаний на разрыв (при растяжении) удовлетворяют требованиям по пределу текучести  $\sigma_t$ , временному сопротивлению  $\sigma_b$  и относительному максимальному удлинению  $\delta$  материала АМг5.

### Заключение

Резистивным электроконтактным методом проведена оценка напряженного состояния образцов из материала АМг5, получаемых методом ротационной вытяжки. Можно утверждать, что предложенная методика применима при различных производственных условиях, для деталей, отличающихся по размеру и форме, изготавливаемых ротационной вытяжкой трубных или листовых заготовок из алюминий-магниевого и алюминиевого деформируемых сплавов. Предлагаемая методика исследования позволяет создавать базу данных (зависимость уровня остаточных напряжений в поверхностном слое материала от применяемого оборудования и режимов обработки), которой впоследствии может пользоваться любое предприятие, обладающее таким или аналогичным оборудованием.

### Литература

1. Яковлев С.П., Трегубов В.И., Яковлев С.С. Изменение механических свойств горячекатаных труб из стали 12ХЗГНМФА при ротационной вытяжке // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. № 2–2. С. 3–11.
2. Дудка Д.В., Трегубов В.И. Влияние технологических параметров на образование напыва при ротационной вытяжке осесимметричных деталей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. № 1. С. 3–13.
3. Гредитор М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание. М.: Машиностроение, 1971. 239 с.
4. Добровольский В.И., Куликов А.Д., Бурлаков И.А. Анализ распределения деформаций при ротационной вытяжке // Научные труды (Вестник МАТИ). 2010. № 17 (89). С. 167–171.
5. Ivanov A.Y., Leonov D.B. Analysis of the methods for control and measurement of residual stress // Journal of the Technical University - Sofia, Plovdiv branch. 2012. V. 17. P. 13–19.
6. Мрочек Ж.А., Макаревич С.С., Кожуро Л.М. и др. Остаточные напряжения. Минск: УП «Технокрит», 2003. 352 с.
7. Kraus I., Trofimov V.V. Rentgenová tenzometrie. Praha: Academia, 1988. 248 p.
8. Handbook of residual stress and deformation of steel / ed. by Totten G., Howes M., Inoue T. Ohio: ASM International, 2002. 550 p.
9. Валетов В.А., Васильков С.Д., Сисюков А.Н., Юльметова О.С. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов: Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 92 с.
10. Васильков С.Д., Александров А.С., Афанасьев И.В. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из алюминиевого сплава после механической обработки // Инструмент и технологии. 2010. № 27. С. 26–29.
11. ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Введ. 01.07.1977. М.: Изд-во стандартов, 1976. 28 с.
12. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. Введ. 01.07.1978. М.: Издательство стандартов, 1978. 48 с.
13. Леонов Д., Иванов А. Контроль остаточных напряжений при спиннинговании на детали от алюминий-магниевого сплава // Сборник научных трудов от «Юбилейна научна конференция по повод 10 години от създаването на НВУ». Велико Търново. 2012. Т. 7. С. 120–126.
14. Иванов А.Ю., Леонов Д.Б. Технологические методы обеспечения качества изделия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 5 (75). С. 111–114.
15. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.01.1986. М.: Изд-во стандартов, 1984. 24 с.

<i>Леонов Димитян Божидаров</i>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия; начальник отдела, ВМЗ АО Сопот, Сопот, Болгария, dimilqn@mail.ru
<i>Васильков Сергей Дмитриевич</i>	– кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, vasilkovsd@mail.ru
<i>Иванов Андрей Юрьевич</i>	– кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, ivaanur72@mail.ru
<i>Dimilyan B. Leonov</i>	– postgraduate; ITMO University, Saint Petersburg, Russia; Section head, VMZ Co, Sopot, Bulgaria, dimilqn@mail.ru
<i>Sergey D. Vasilkov</i>	– Associate professor, PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, vasilkovsd@mail.ru
<i>Andrei Yu. Ivanov</i>	– Associate professor, PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, Russia, ivaanur72@mail.ru

Принято к печати 25.12.13

Accepted 25.12.13