

ЛОБАНОВ В.К., д-р техн. наук,
ПАШКОВА Г.И., канд. техн. наук, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОРПУСАХ РЕДУКТОРОВ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

В роботі виконано дослідження впливу різних варіантів термічного та вібраційного зміцнення на рівень залишкових напружень і стабілізацію розмірів отворів складних корпусних деталей з алюмінієвих сплавів. Показано позитивний вплив віброобробки на стабільність геометричних параметрів деталей і рівень залишкових напружень.

В работе выполнено исследование влияния различных вариантов термического и вибрационного упрочнения на уровень остаточных напряжений и стабилизацию размеров отверстий сложных корпусных деталей из алюминиевых сплавов. Показано положительное влияние виброобработки на стабильность геометрических параметров деталей и уровень остаточных напряжений.

In the work the influence of different variants of thermal and vibration hardening on the level of residual stresses and stabilization of the size of the holes complex body parts from aluminium alloys was studied. It is shown the positive influence of vibrating on the stability of the geometrical parameters parts and the level of residual stresses.

Для современного машиностроения актуальной задачей является повышение надежности и долговечности машин, при этом на первый план выступает вопрос регулирования остаточных напряжений в них. Известно, что остаточные напряжения возникают в деталях в результате действия различных технологических факторов в процессе их изготовления (при литье, ковке, термической и механической обработке и др.) [1, 2]. Остаточные напряжения по своей величине могут превосходить напряжения от внешних нагрузок и приводит к разрушению конструкций, короблению деталей и т. д. Особенно актуальна проблема остаточных напряжений для крупногабаритных литых изделий.

Корпусы редукторов гусеничных машин относятся к числу наиболее ответственных деталей, изготавливаемых из алюминиевых сплавов методом литья. Корпус редуктора – сложная по конфигурации отливка, имеющая более десяти отверстий диаметром от 100 до 255 мм (рис. 1).

Установлено [3], что в процессе изготовления происходит неоднократное самопроизвольное изменение формы и размеров выполненных от-

верстий. Одной из возможных причин возникновения необратимых деформаций в корпусах могут быть остаточные напряжения.

Зафиксировано также возникновение трещин на деталях, что является косвенным свидетельством их неравномерного напряженного состояния и высоких значений растягивающих напряжений.

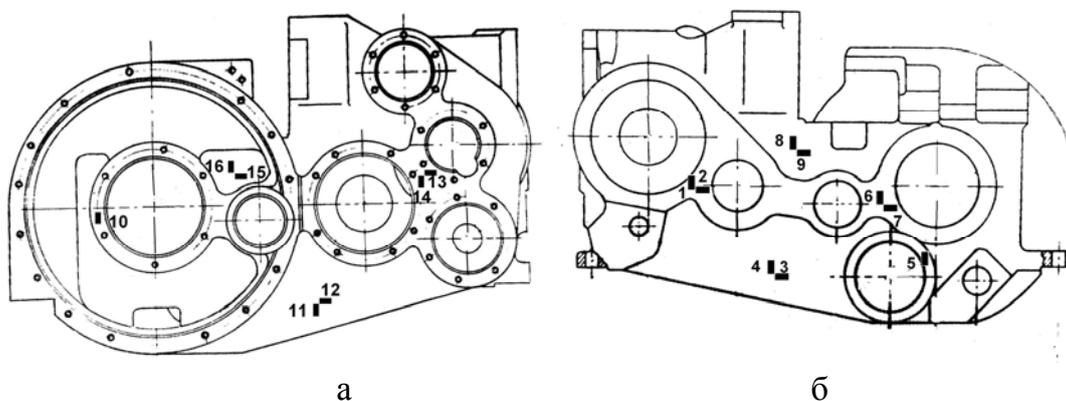


Рисунок 1 – Эскиз корпуса редуктора из сплава АК6Мг:
а – основной вид; б – с тыльной стороны

В настоящее время для снижения напряжений, стабилизации формы и размеров конструкций во многих отраслях промышленности наряду со стабилизационным отпуском применяют вибрационную обработку [4-8].

Целесообразно определить возможность применения термической и вибрационной обработок для регулирования остаточных напряжений в литых алюминиевых корпусах. При этом следует иметь в виду, что в настоящее время в мировой литературе существуют, по меньшей мере, две основные концепции виброобработки деталей с целью стабилизации их размеров:

– по мнению представителей фирмы «Martens» и других исследователей виброобработка наиболее эффективна в тех случаях, когда в детали в результате возбуждения вибраций возникают небольшие по величине вибронапряжения. В этом случае стабилизация размеров реализуется за счет изменения микронапряжений, что приводит к увеличению релаксационной стойкости материала детали. Остаточные макронапряжения при такой обработке изменяются незначительно или вообще не меняются.

– с точки зрения других авторов для стабилизации размеров сварных и литых деталей в них следует возбуждать высокие вибронапряжения, которые, складываясь с остаточными макронапряжениями, превышают динамический предел текучести и вызывают релаксацию остаточных напряжений. Уменьшение величины этих напряжений и приводит к стабилизации геометрии детали при различных внешних воздействиях либо с течением времени.

Целью настоящей работы является оценка уровня остаточных напряжений в корпусах редукторов гусеничных машин, изготовленных по различным технологическим схемам, и определение эффективности предложенных обработок для стабилизации размеров отверстий указанных деталей.

Для исследований были использованы отливки корпусов из сплава АК6Мг (6,0-8,0 % Si; 0,2-0,4 % Mg; Al – ост.) следующих вариантов изготовления:

1. отливка (литьем в кокиль), без термической обработки;
2. термическая обработка по серийному режиму (нагрев до температуры $535 \pm 5^\circ\text{C}$, закалка в воду, старение при 180°C в течение 5 ч.);
3. термообработка, включающая закалку в перевернутом положении (тыльной стороной вверх) по серийному режиму;
4. термообработка по серийному режиму с последующей вибрационной обработкой.

Вибрационная обработка корпусов осуществлялась на универсальной экспериментальной установке модели 489Р, состоящей из подпружиненного вибростола, вибратора (вибровозбудителя) и пульта управления, позволяющей плавно изменять частоту нагружения от 20 до 100 Гц, регулировать возмущающую силу на резонансных частотах в пределах до 12 кН, регистрировать ток, потребляемый вибровозбудителем, и частоту возбуждения колебаний.

Для выбора оптимальных параметров и режима вибростабилизационной обработки была проведена специальная работа [9]. Однако, в связи с тем, что детали для исследования поступили без механической обработки и поэтому имели во внутренней полости литниковую систему, играющую роль ребра жесткости, параметры режима возбуждения несколько отличались от разработанных. Вибрационная обработка корпусов производилась при частоте порядка 85 Гц и величине тока нагрузки 0,85 А. При этом ЭДС вибродатчика, установленного на расстоянии 20 мм от края отливки, составляла 45-46 мВ.

Значения твердости корпусов, определяемые методом Польди, приведены в таблице 1.

Оценка эффективности предложенных вариантов обработки осуществлялась путем изучения характера изменения размеров отверстий в корпусах с течением времени по методике, изложенной в работах [3,9]. Изменение размеров отверстий производилось непосредственно после изготовления, через сутки, а затем через 15 суток после изготовления.

Измерение остаточных напряжений на поверхности отливок корпусов производилось при помощи двух механических методов – отверстий и трепанаций [1,10].

Таблица 1 – Средние значения твердости алюминиевых корпусов различных вариантов изготовления

№ п/п	Вариант изготовления	Средние значения твердости, НВ
1	Отливка, без термообработки	42
2	Серийная термообработка	93
3	Термообработка в перевернутом положении	76
4	Серийная термообработка, виброобработка	78

Оба способа являются разрушающими и основаны на измерении деформаций в различных зонах детали, возникающих при нарушении ее сплошности вследствие рассечения. При этом указанные методы дополняют друг друга – метод трепанаций позволяет производить измерения на ровных участках значительной протяженности, поскольку трепанируется зона поверхности, на которой расположены розетка тензодатчиков и переходные монтажные колодочки. Метод отверстий дает возможность определить остаточные напряжения в меньших по площади зонах, но очень сильно зависит от параметров рассечения: диаметра и глубины отверстия, расстояния от места измерений и т. д.

Определение деформаций при исследовании остаточных напряжений производили способом электротензометрии [11] с использованием проводочных тензорезисторов типа 2ПКБ-10-100В, которые наклеивались клеем циакрин ЭО и защищались от стружки резиновыми пластинами. Термокомпенсационные тензорезисторы наклеивали аналогично рабочим на пластины из того же материала, что и корпусы. Для определения деформаций были использованы полумостовые измерительные схемы подключения тензорезисторов. Выходные сигналы тензорезисторов до и после сверления отверстий либо выделения трепанируемого участка фиксировали с помощью тензометрической системы СИИТ-3 с коэффициентом чувствительности равным $1,98 \cdot 10^{-6}$ единиц относительной деформации.

Рассечение детали в обоих случаях осуществлялось методом высверливания: диаметр сверла 6 мм, скорость сверления 300 мин^{-1} .

Для исследования остаточных напряжений на каждый из корпусов наклеивалось по 16 тензорезисторов, места расположения которых показаны на рис. 1 а, б. Тензорезисторы располагались в основном в двух взаимно перпендикулярных направлениях – прямоугольные розетки, включающие тензорезисторы с номерами 1 и 2, 3 и 4, 6 и 7, 8 и 9, с одной стороны корпуса, а розетки с тензорезисторами №№ 11 и 12, 13 и 14, 15 и 16 – с другой. Кроме этого были использованы два одиночных тензорезистора – № 5 и № 10. Таким образом, тензорезисторы располагались в зонах размещения контролируемых отверстий, в местах переходов сечений, а также в районах, расположенных вдали от отверстий. В зонах большой протяженности, но небольшой толщины (тензорезисторы №№ 3, 4; 8, 9; 11, 12; 15,

16), измерения проводились методом трепанаций, а в локальных зонах большой толщины – методом отверстий.

Метод трепанаций предусматривает полное отделение изучаемого участка от остальной детали. Возникающие при этом деформации, измеренные тензорезисторами, зависят от величины и знака остаточных напряжений в детали до рассечения.

Расчет остаточных напряжений в заданных двух взаимно перпендикулярных направлениях производился по известной методике [1].

Метод отверстий основан на перераспределении напряжений вблизи одного из простейших концентраторов – круглого отверстия. Деформации на поверхности детали, возникающие в результате сверления сквозных отверстий, обусловлены величиной и знаком исходных остаточных напряжений. Для расчетов величин остаточных напряжений были использованы формулы, приведенные в работе [10].

Обобщенные результаты исследования остаточных напряжений в корпусах приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения остаточных напряжений в алюминиевых корпусах различных вариантов изготовления

№ п/п	Вариант изготовления	Значения остаточных напряжений, МПа
1	Отливка, без термообработки	– 28,8 ... + 38,0
2	Серийная термообработка	– 39,8 ... + 63,6
3	Термообработка в перевернутом положении	– 38,7 ... + 106,0
4	Серийная термообработка, виброобработка	– 56,3 ... + 44,2

Следует отметить, что сжимающие остаточные напряжения отмечены для корпусов 1, 2 и 4 вариантов изготовления в одних и тех же точках (соответственно тензорезисторы 6, 7 и 13, 14; измерения производились методом отверстий). Во всех остальных исследованных точках зафиксированы растягивающие остаточные напряжения. Для деталей с опытным вариантом термической обработки напряжения сжатия зарегистрированы в 10-ти точках из 16-ти.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы о характере напряженного состояния корпусов различных технологических вариантов изготовления:

– распределение напряжений в корпусах крайне неравномерно: в разных точках детали возникают различные по величине и знаку остаточные напряжения от - 56,3 МПа (сжимающие) до + 106 МПа (растягивающие). Причины такой неравномерности распределения напряжений заключаются в очень сложной конфигурации детали (наличие большого числа крупных отверстий, обилие переходов сечений, малая жесткость некоторых сечений и пр.). Такие напряжения вследствие высокой неравномерно-

сти и значительных величин на всех стадиях получения заготовки приводят к необратимым деформациям детали;

– обе поверхности корпусов напряжены примерно одинаково как после отливки, так и после термообработки. Уровень растягивающих остаточных напряжений в корпусах после отливки не превышает + 38 МПа. После термической обработки по серийному режиму их значения несколько возрастают и достигают + 63,6 МПа. Это связано с общим повышением механических характеристик материала корпусов после термообработки;

– при закалке корпусов в перевернутом положении характер распределения напряжений по поверхности детали меняется: если для остальных вариантов количество растягивающих напряжений существенно превышает количество сжимающих, то в корпусах с измененной технологией термообработки в 2,5 раза больше количество точек, в которых зафиксированы остаточные напряжения сжатия. Если исходить из общей концепции благотворного влияния на прочность сжимающих остаточных напряжений, то следует считать, что распределение напряжений в данном случае является наиболее благоприятным;

– реализация операции вибрационной обработки деталей, термообработанных по серийной технологии, не оказывает существенного влияния на уровень остаточных напряжений и характер их распределения по поверхности корпусов. Следует отметить лишь некоторое увеличение значений остаточных напряжений сжатия.

Обобщенные результаты измерений размеров отверстий в корпусах с различными вариантами изготовления показаны на диаграмме, приведенной на рис. 2.

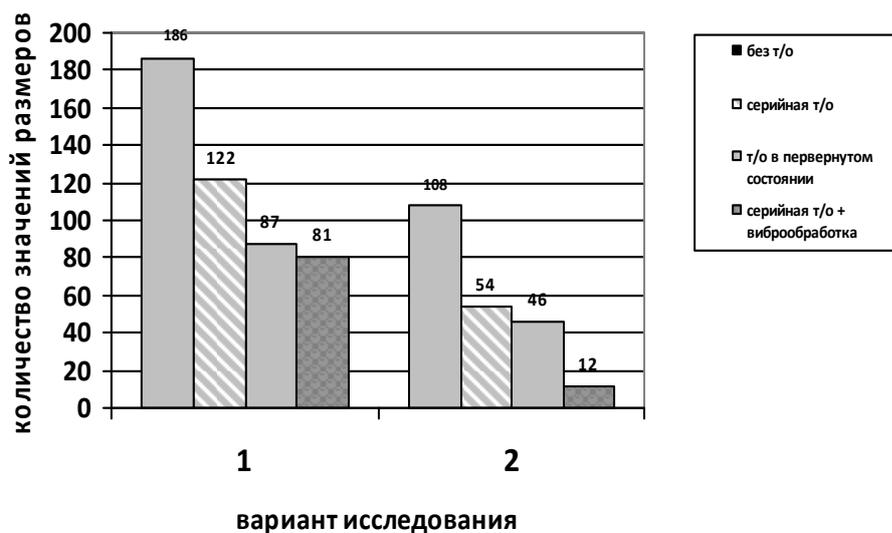


Рисунок 2 – Количество проконтролированных размеров отверстий, выходящих за пределы поля допусков, при измерениях: 1 – через сутки; 2 – через 15 суток

Следует отметить, что непосредственно после изготовления все размеры отверстий находились в пределах чертежных допусков. Последующее вылеживание приводит к заметному изменению исходных размеров отверстий и к отклонению их от чертежных допусков.

Результаты исследований, приведенные на диаграмме, свидетельствуют о высокой эффективности вибрационной обработки, особенно при вылеживании корпусов.

Таким образом, благоприятное воздействие виброобработки в данном случае обусловлено, вероятнее всего, не изменением уровня и характера распределения остаточных напряжений, а повышением релаксационной стойкости материала.

Результаты проведенных исследований реализованы в опытно-промышленном производстве путем создания гибкого участка с виброкомплексом для изготовления корпусных деталей, что позволило существенно повысить их качество.

Список использованных источников: 1. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с. 2. Технологические остаточные напряжения / под ред. *А.В. Подзезя.* – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с. 3. *Лобанов В.К., Пащикова Г.И.* Стабилизация геометрических параметров литых корпусов редукторов гусеничных машин // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2011. – вип. 1 (21). – С. 178-184. 4. *Коцюбинский О.Ю.* Коробление чугуновых отливок от остаточных напряжений. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с. 5. *Винокуров В.А.* Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. – М.: Машиностроение, 1983. – 215 с. 6. *Борздыка А.М., Гецов Л.Б.* Релаксация напряжений в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1972. – 304 с. 7. *Шнеер Ф.З., Панов В.И.* Вибрационная обработка крупногабаритных конструкций с целью уменьшения деформации и склонности к образованию трещин // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 13-15. 8. *Янус Ю.Р.* Исследование влияния вибрационного воздействия на релаксацию остаточных напряжений, структуру и свойства конструкционных сталей и алюминиевых сплавов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук 05.16.04. – Свердловск, 1988. – 21 с. 9. *Лобанов В.К., Пащикова Г.И.* Оптимизация параметров вибрационной обработки литых корпусов редукторов гусеничных машин // Високі технології в машинобудуванні: Збірн. наук. праць. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2011. – вип. 1 (21). – С. 165-177. 10. Остаточные напряжения в заготовках и деталях крупных машин / под ред. *О.Н. Михайлова.* – Свердловск: НИИТЯЖМАШ Уралмашзавода, 1971. – 191 с. 11. *Шушкевич В.А.* Основы электротензометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – 352 с.