

Учитывая, что подкоренное выражение в формуле (15) равно нулю, получим:

$$r_c = r_2 \cdot \sqrt{1 - \frac{P}{\sigma_{\text{пл}}}}. \quad (19)$$

С учетом выражений (18) и (19), определим величину контактного давления из выражения (12):

$$P_c = \sigma_{\text{пл}} \cdot \frac{\left[ r_2^2 \cdot \left( 1 - \frac{P}{\sigma_{\text{пл}}} \right) - r_1^2 \right] \cdot \left[ r_2^2 \cdot \left( 1 - \frac{r_1}{r_2} \right) - 1 \right]}{2r_2^2 \cdot \left( 1 - \frac{P}{\sigma_{\text{пл}}} \right) \cdot (r_2^2 - r_1^2)}. \quad (20)$$

Проведенные теоретические исследования дают возможность определить оптимальные размеры внутреннего и внешнего толстостенных цилиндров, контактные давления при сборке блока стальных колец, а на основе этого определить максимально возможные давления на боковую поверхность матрицы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: ИЛ, 1955. – 444с.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ, 1999. – 591с.

УДК 621.7.016.2 : 669.13

*Покровский А.И., Дудецкая Л.Р., Ласковнев А.П., Хроль И.Н.*

#### **ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ГРАФИТА НА УРОВЕНЬ ШУМА ПРИ РАБОТЕ ШЕСТЕРЕН ИЗ ЛИТОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО ЧУГУНА**

*Физико-технический институт НАН Беларуси,  
г. Минск, Беларусь*

Чугун занимает одно из ведущих мест среди современных конструкционных материалов, причем наблюдается устойчивая тенденция увеличения объемов его использования с преобладанием высококачественных марок. Это объясняется лучшими литейными и технологическими свойствами чугуна по сравнению со сталью, а также некоторыми уникальными, присущими только ему особенностями. Наличие графитных включений обеспечивает меньший, чем у стали, удельный вес, лучшие антифрикционные свойства, способность быстрее гасить вибрации и резонансные колебания, пониженный уровень шума.

Форма графитных включений у различных типов чугунов существенно отличается (пластинчатая, хлопьевидная, шаровидная). Еще большее многообразие видов графитных включений (в форме дисков, эллипсоидов, веретен, нитей) обеспечивает горячая пластическая деформация чугуна [1]. Используя деформацию, из чугуна возможно изготовление ответственных машиностроительных деталей, например автомобильных шестерен [2, 3]. Представляется

интересным оценить влияние морфологии графитных включений на уровень шума при работе конкретных деталей.

Цель работы – исследование влияния морфологии графита в литом и деформированном чугунах на уровень звукового давления (УЗД) при работе шестерен трансмиссии автомобиля Минского автомобильного завода (МАЗ).

Материалы для исследований. Исследования проводили на типовых представителях четырех классов чугунов доэвтектического состава: серого, половинчатого, ковкого и высокопрочного. Химический состав чугунов представлен в таблице 1.

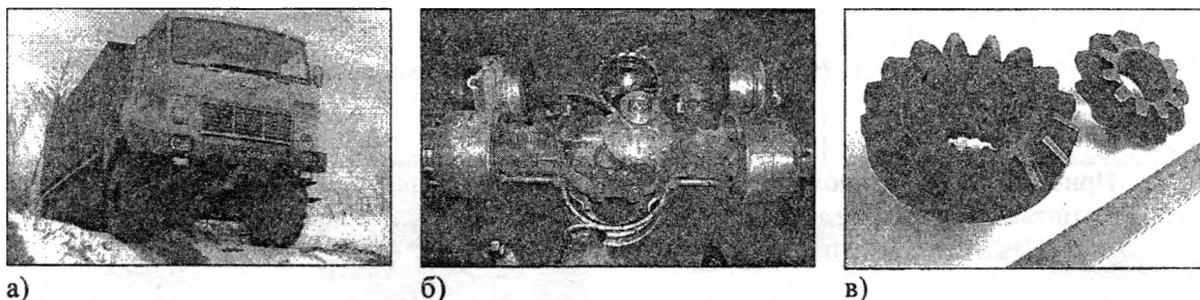
**Таблица 1 – Химический состав исследуемых чугунов, масс. %**

Тип чугуна	C	Si	Mn	Ni (Cu)	Mg	P	S
Ковкий	2,4-2,8	1,1-1,5	0,7-0,9	-	-	до 0,1	до 0,05
Высокопрочный	3,2-3,6	1,7-2,1	0,5-0,7	0,4-0,6	0,04-0,06	до 0,08	до 0,01

В качестве контрольного материала использовали цементуемую сталь 20ХНЗА (ГОСТ 4543-71), применяемую на МАЗе серийно, для изготовления этих шестерен.

Исследуемые зубчатые пары:

1. Шестерни дифференциала автомобиля МАЗ 5336 (рис. 1, а). Эта зубчатая пара, расположена в заднем мосту (рис. 1, б) автомобиля и включает в себя шестерню полуоси (5336-2402050) весом 3,3кг, диаметром 118 мм и два сателлита (5536-2402055) весом по 1,05 кг, диаметром 89 мм (рис. 1, в). Шестерни изготавливали из трех видов материалов: легированной стали, ковкого литого, высокопрочного литого и высокопрочного деформированного чугунов, по трем различным технологиям: серийно применяемой на МАЗе (сталь 20ХНЗА), и опытным: литейной и литейно-деформационной (ковкий и высокопрочный чугуны).

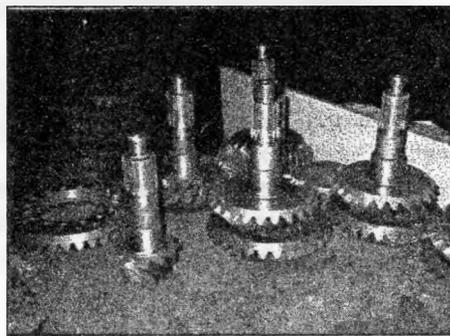


*Рис. 1. Грузовой автомобиль МАЗ-5336 (а), его задний мост (б), шестерни дифференциала (слева - шестерня полуоси, справа - сателлит) (в)*

2. Шестерни главной зубчатой пары трансмиссии автомобиля МАЗ-5551 (рис. 2, а), ведущую шестерню (вал-шестерню) (дет. 5551-2402017) массой 10,4 кг и ведомую шестерню (дет. 5551-2402060) массой 13,8 кг (рис. 2, б, в). Нагрузки, испытываемые данными шестернями гораздо выше, чем в дифференциале, поэтому в качестве материала использовали высокопрочный чугун, обладающий лучшей деформируемостью и прочностными свойствами. Для гарантированной прокаливаемости при изотермической закалке, учитывая значительную массу и толщину стенок отливки (от 50 до 150 мм), чугун дополнительно легировали медью или никелем (0,5%).



а)



б)

Рис. 2. Грузовой автомобиль МАЗ-5551 (а), ведущая и ведомая шестерни главной пары трансмиссии МАЗ-5551 (б)

Большинство технологических операций, включая плавку чугуна, механическую обработку шестерен и их изотермическую закалку проводили на производственных площадях МАЗа. Штамповку заготовок зубчатых колес проводили на опытном производстве ФТИ НАН Беларуси. В таблице 2 представлены использованные сочетания материалов и технологий при изготовлении шестерен.

Таблица 2 – Варианты материалов и технологий, использованных при изготовлении исследуемых шестерен.

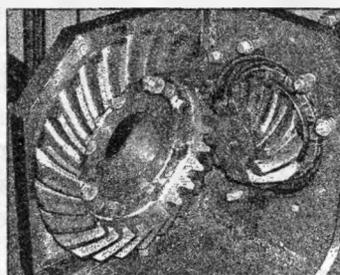
Тип зубчатой пары и марка автомобиля	Материал зубчатой пары и технология изготовления				
	Сталь 20ХНЗА прокат	Ковкий чугун		Высокопрочный чугун	
		литой	деформированный	литой	деформированный
1. Шестерни дифференциала МАЗ-5336	+	+	+	+	+
2. Шестерни главной пары МАЗ-5551	+	-	-	+	-

Примечание. На данном этапе работ массивные шестерни главной пары из чугуна еще не были отштампованы. Поэтому производилось сравнение только литых шестерен из высокопрочного чугуна и серийных из стали 20ХНЗА.

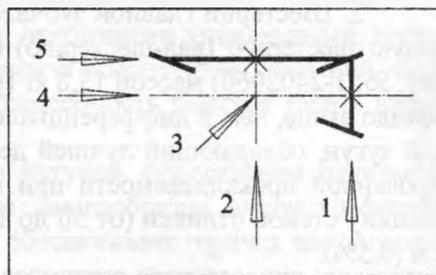
Методики исследования. Сравнительные испытания проводили в цехе редукторов механосборочного производства МАЗа (рис. 3, а). Частота вращения ведущей шестерни составляла 625 мин<sup>-1</sup>.



а)



б)



в)

Рис. 3. Методика исследований пятна контакта и измерения УЗД (на примере шестерен главной зубчатой пары трансмиссии а/м МАЗ-5551). Процесс обкатки на контрольно-обкатном станке (а), расположение шестерен при обкатке аналогично расположению на стенде при испытаниях на статическую прочность (б), схема расположения микрофона при замере УЗД (пять вариантов) относительно зубчатой пары (в)

Измерительная аппаратура, используемая при проведении исследований, приведена в таблице 3.

**Таблица 3 – Используемая при измерении УЗД измерительная аппаратура.**

№ п/п	Наименование
1.	Шумомер-анализатор спектров (фирмы Larson & Davis).
2.	Акустический калибратор CAL200 (фирмы Larson & Davis).
3.	Микрофонный предусилитель PRA900C (фирмы Larson & Davis).
4.	Микрофон типа 2541 (фирмы Larson & Davis).

Схема вариантов расположения микрофона относительно зубчатой пары при замере УЗД показана на рис. 3, б, в.

#### **Результаты исследований.**

##### **Исследования зоны касания зубьев.**

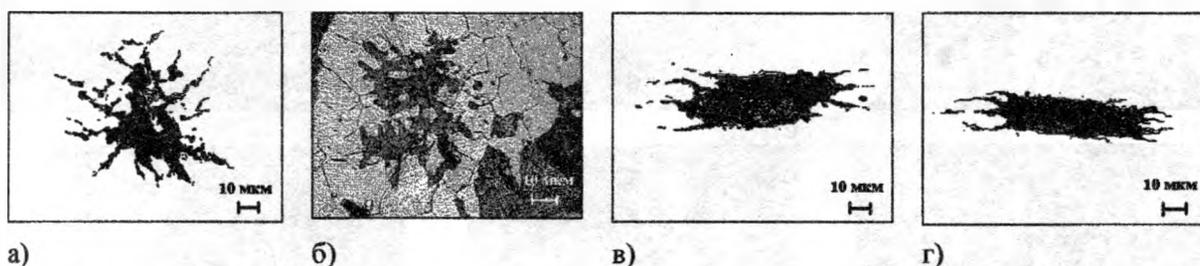
В первую очередь провели сравнительные исследования пятна контакта (чтобы в дальнейшем исключить этот фактор при оценке уровня шума) у серийных зубчатых колес и у зубчатых колес из деформированного бейнитного чугуна. Обкатку проводили на контрольно-обкатном станке модели 5Б725 фирмы "Глиссон". Установлено, что зоны касания в зубьях зубчатых колес чугунных и стальных шестерен абсолютно идентичны.

Исследование уровня шума шестерен дифференциала МАЗ 5336.

Измерения показали, что уровень шума при работе зубчатых колес из чугуна меньше, чем у колес из стали, причем эта разница составляет:

- для литых ковкого и деформированного чугунов ниже на 0,9-1 дБА,
- для деформированного высокопрочного чугуна ниже на 1-2 дБА,
- для деформированного ковкого чугуна ниже на 3-4 дБА.

Исследование микроструктуры и морфологии графита. Микроструктура ковкого чугуна в исходном состоянии представлена на рис. 4, а, б. Графит имеет хлопьевидную форму с размером включений до 25 мкм (КГд25) и занимает около 6% от площади шлифа. Металлическая матрица чугуна – феррито-перлитная с дисперсностью перлита Пд0,5.



*Рис. 4. Микроструктура ковкого чугуна литого (а, б) в нетравленном (а) и травленном (б) состоянии (травлено нитратом) и после деформации выдавливанием со степенью деформации 40% (в) и 60 % (г) (не травлено)*

После горячей пластической деформации форма графита ковкого чугуна существенно изменяется (рис. 4, в, г). При степени деформации 20% (рис. 4, в) в продольном направлении включения разворачиваются вдоль вытяжки, удлиняясь до размера КГд45. В поперечном сечении размер включений уменьшается до 10-20 мкм. До степени деформации 60% хлопьевидная форма графита еще сохраняется в поперечном сечении, а в продольном направлении наблюдается вытягивание включений (рис. 4, г). При степени деформации 80% на продольном шлифе наблюдается строчечность графита.

Структура высокопрочного чугуна в исходном состоянии представлена на рис. 5. Графитные включения (рис. 5, а, в, д) имеют правильную шаровидную форму ШГф5, диаметр включений графита не превышает 25-45 мкм (ШГд25-ШГд45), количество графита в структуре составляет 6-10% (ШГ6-ШГ10). Металлическая основа чугуна состоит из перлита и феррита. Дисперсность перлита составляет ПД0,3. Количество феррита не превышает 30%.

После горячего выдавливания наибольшие изменения в форме графита происходят в продольном направлении вытяжки. При этом графитные включения вытягиваются вдоль течения металла, приобретая своеобразную текстуру деформации, меняя свою форму по мере увеличения степени деформации от овальной до веретенообразной и нитевидной.

Для чугуна, обладающего ярко выраженной гетерогенной структурой, важным материаловедческим аспектом штамповки шестерен является возможность регулирования характером структуры по сечению зуба. Наиболее очевидным путем, является управление формой и расположением включений графита по сечению зуба. Для примера, на рис. 6 представлен один из вариантов распределения графитных включений в разных сечениях поковки. У основания зуба, где в процессе зацепления возникают максимальные напряжения, графитные включения вытянуты и повторяют эвольвенту зуба. При этом волокна располагаются перпендикулярно нагрузке, прилагаемой в процессе зацепления с сопрягаемой шестерней. Это благоприятно сказывается на сопротивлении усталости при изгибе. В центральной части поковки шестерни, где степень деформации невысока, включения графита сохраняют округлую форму и обеспечивают высокую вязкость сердцевины.

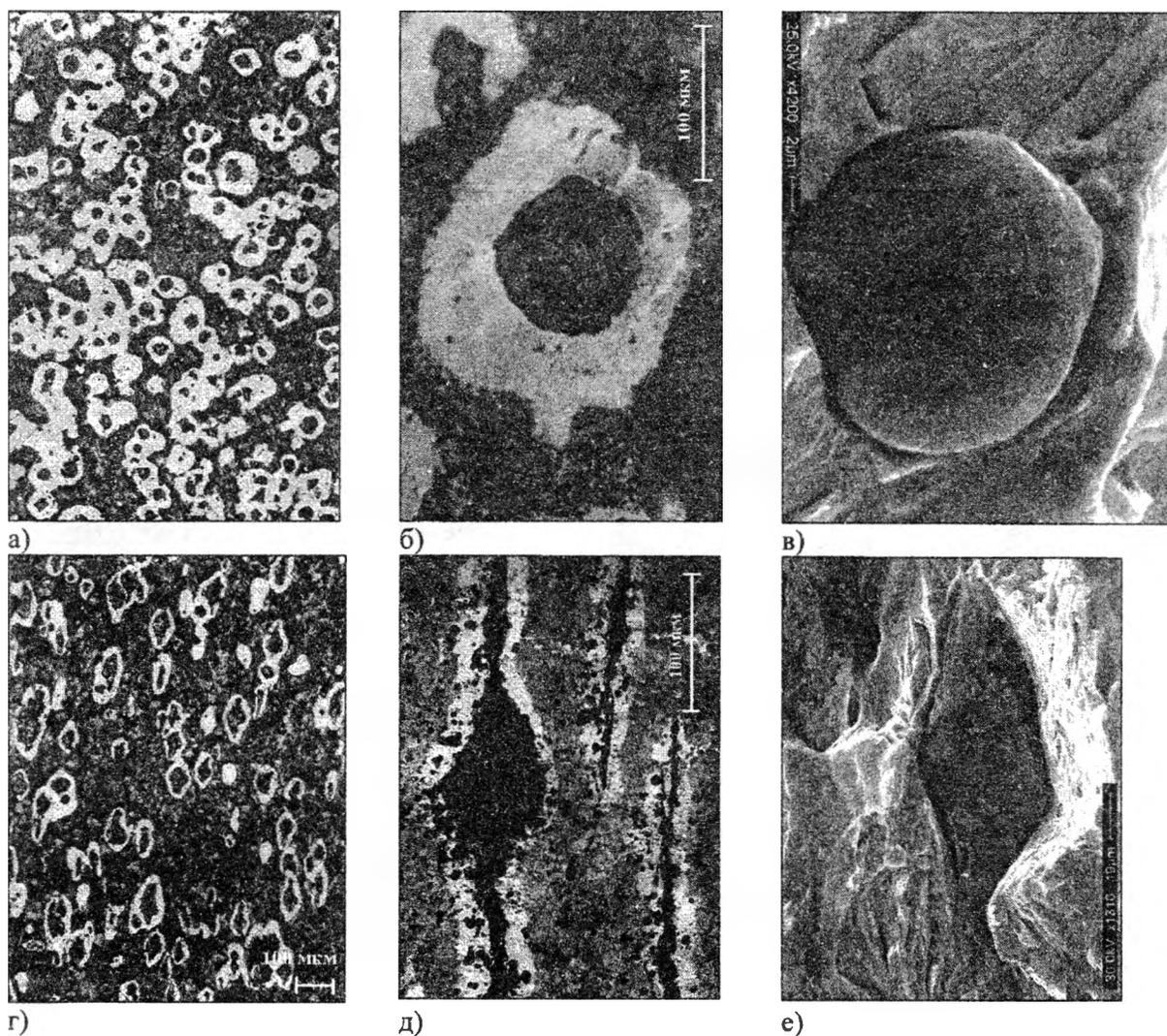


Рис. 5. Микроструктура высокопрочного чугуна в литом (а, б, в) и деформированном (г, д, е) состояниях

Анализируя форму графита в литом и деформированном чугунах можно сделать вывод, что как в ковком, так и в высокопрочном она становится более вытянутой. Образующиеся волокна могут служить барьерами для звуковой волны и при их огибании происходит более интенсивное затухание звука.

Сравнивая морфологию графита ковкого и высокопрочного чугуна в деформированном состоянии можно отметить большую компактность формы графита у высокопрочного чугуна. Это характерно, по крайней мере, до средних степеней деформации порядка 60%, при более высоких степенях отличия нивелируются и включения приобретают вытянутую нитевидную форму. До степени деформации 60% (как показано на рис. 4, в, г) ковкий чугун одновременно со сдавливанием и «выглаживанием» боковых поверхностей сохраняет по краям т.н. «хлопьевидную» форму с множеством отростков.

Можно предположить, что сочетание приплюснутой формы графита с хлопьевидными ответвлениями по краям является лучшим барьером для звука, чем простая шаровидная форма графита высокопрочного чугуна (рис. 5, в) или классическая хлопьевидная (рис. 4, а) форма ковкого чугуна.

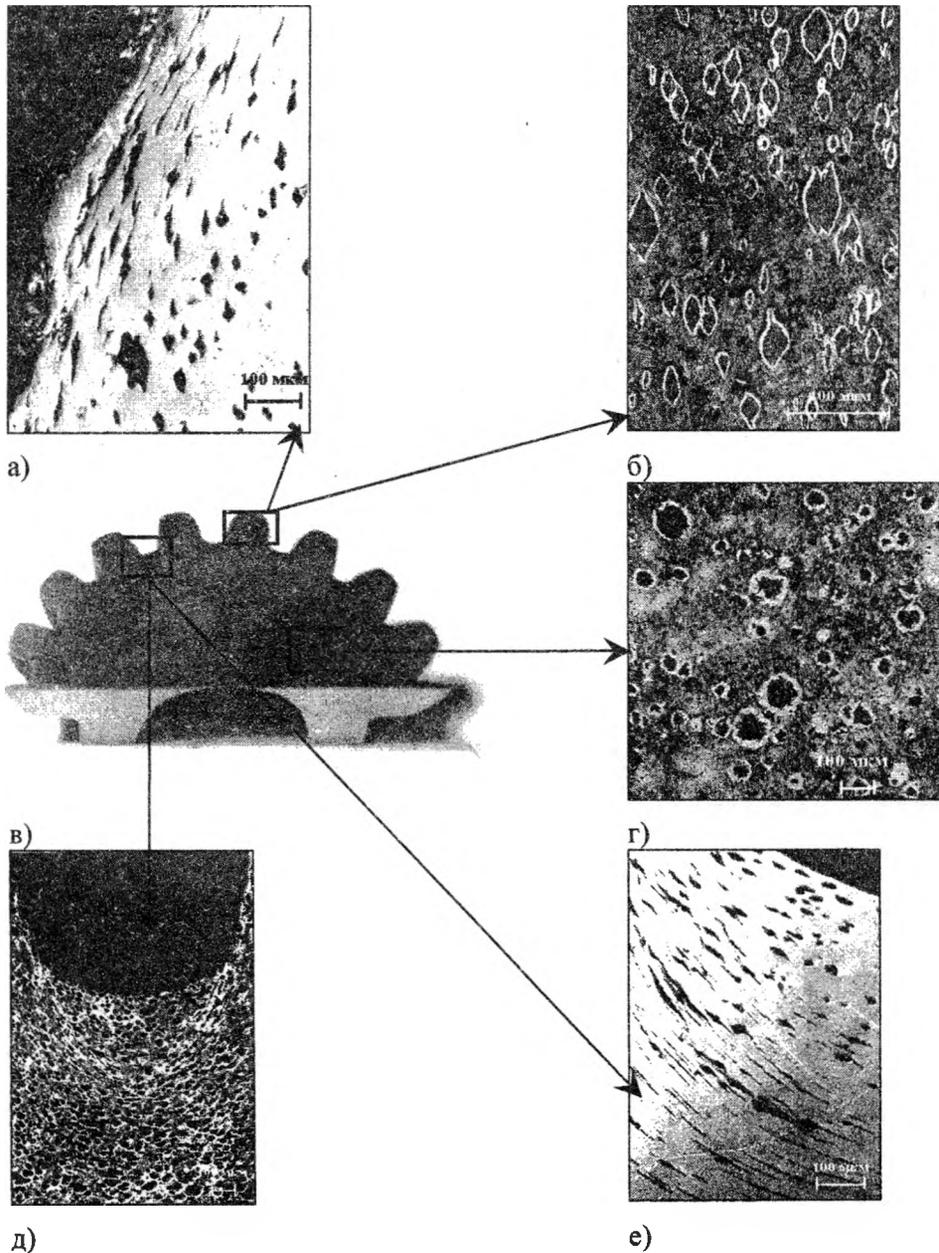


Рис. 6. Возможное распределение структур в различных зонах штампованной чугунной шестерни (в): вершина зуба (а, б), г) - срединная часть шестерни, впадина зуба (д, е)

### Исследование уровня шума при работе шестерен главной пары МАЗ-5551.

Шестерни главной пары МАЗ-5551 кроме стандартного исполнения из стали 20ХНЗА, изготавливались из высокопрочного чугуна в литом исполнении с последующей закалкой на бейнитную структуру. Шестерни этого типоразмера из деформированного чугуна не испытывались. В таблице 4 приведены результаты замеров УЗД при измерении в пяти указанных точках.

Таблица 4 – Уровни звукового давления, дБА.

Материал пары и № шестерен	УЗД (дБА) в пяти точках:				
	1	2	3	4	5
Сталь	87,4	89,1	89,4	86,5	86,0
Высокопрочный чугун (1-1)	87,2	86,9	86,4	85,5	85,0
Высокопрочный чугун (2-3)	87,0	87,7	88,1	84,5	84,2
Фон*	83,7	83,1	83,6	83,6	82,2

Результаты испытаний в виде записи спектра шумов при работе зубчатой пары в наиболее распространенной области частот от 0 до 5000 герц в пяти точках измерения приведены на рис. 7.

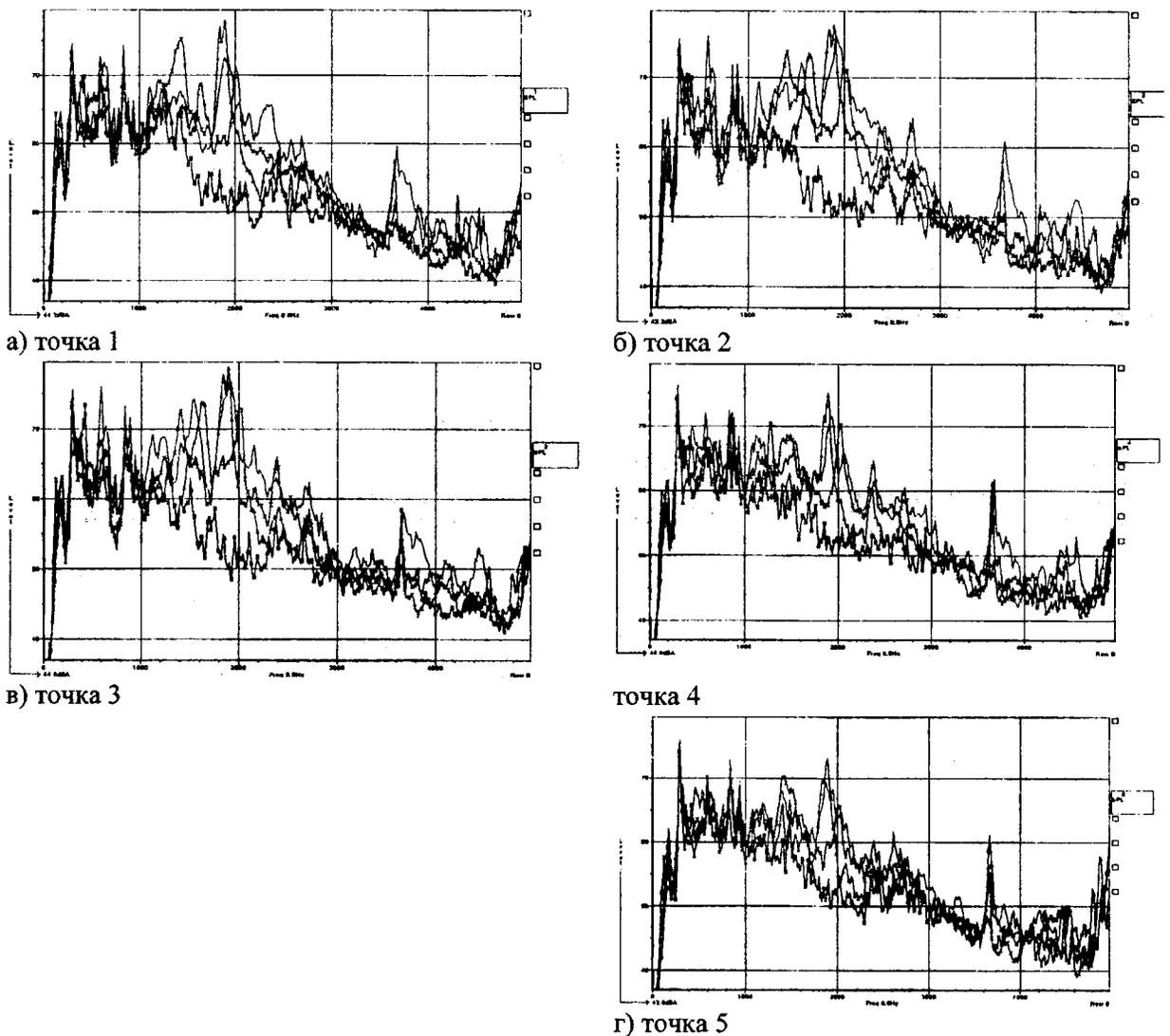
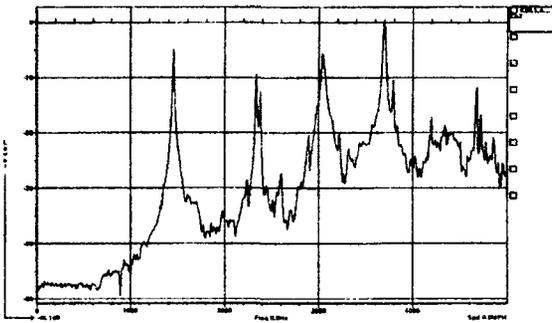
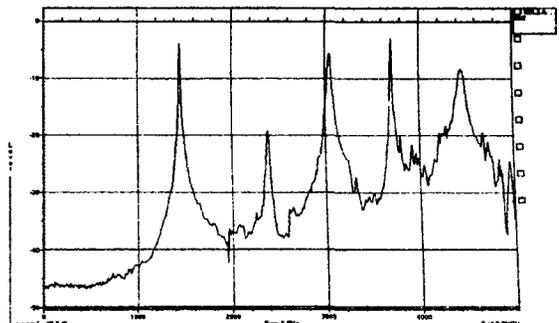


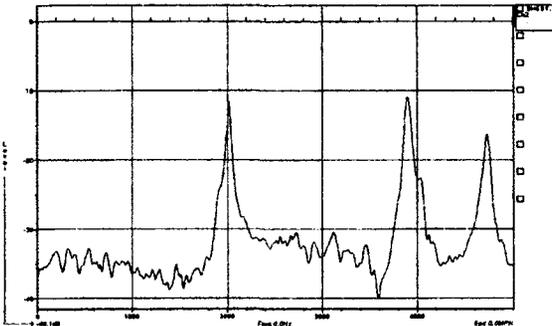
Рис. 7. Спектры шумов при работе зубчатых пар из различных материалов: — — стальной пары; xxxxx – пары из высокопрочного чугуна (1-1); ΔΔΔΔΔ – пары из высокопрочного чугуна (2-3); □□□□□ – фонового шума. На рисунках указаны точки установки микрофонов



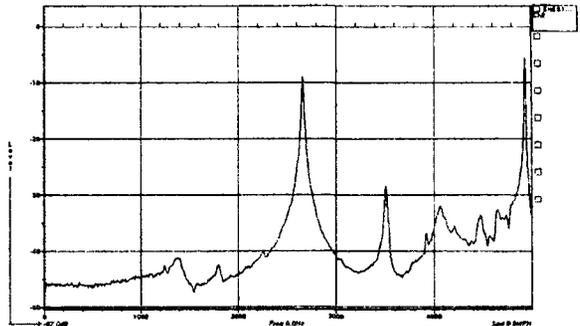
д) спектры собственных частот колеса №1



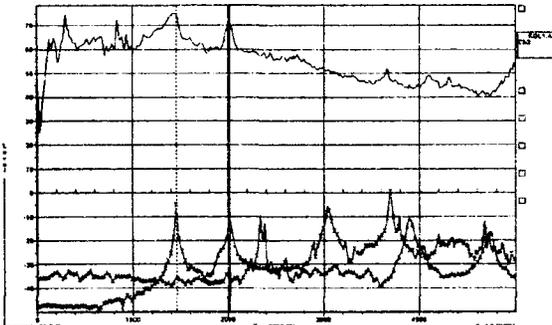
е) спектры собственных частот колеса №2



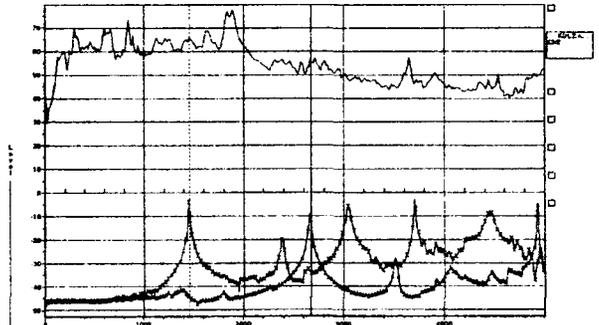
ж) Спектры собственных частот шестерни №1



з) спектры собственных частот шестерни №3



и) спектр шума пары из ВЧ:  
 xxxxx – спектр собственных частот колеса №1;  
 ΔΔΔΔ – спектр собственных частот шестерни №1



к) спектр шума пары из ВЧ:  
 xxxxx – спектр собственных частот колеса №2;  
 ΔΔΔΔ – спектр собственных частот шестерни №3

Окончание рис. 7

Анализ графиков и данных, приведенных в таблице 4, показывает, что серийная пара, изготовленная из стали 20ХН3А создает УЗД до 3 дБА превышающий УЗД пар из высокопрочного чугуна. Вместе с тем следует отметить несколько моментов по результатам и условиям их получения:

1. Спектры разных пар из ВЧ имеют различные высокоуровневые составляющие. Имеются также отличия в спектрах при исследовании собственных частот деталей. Особенно это касается вал-шестерни, что может объясняться целым рядом факторов - отличиями в геометрии сопряженных деталей, химическом составе или структуре материала и т.п.

2. Данные из таблицы 4 показывают несколько нестабильные результаты в пользу пар из чугуна – в т.1 имеется обратная зависимость. Это может быть связано с разным вкладом различных частотных составляющих в общий уровень шума в различных точках, хотя эта разница находится в пределах погрешности для данного класса аппаратуры.

3. При возможности производить контролируемое нагружение пары данные измерения УЗД могут отличаться от данных, приведенных в таблице 4 как в лучшую сторону, так и в

худшую относительно серийной пары. Здесь многое зависит от изгибной жесткости зубьев и качества изготовления и установки зубчатой пары. При недостаточной изгибной жесткости в спектре должны появляться высокоуровневые составляющие на зубцовой частоте ( $fz=(n*z)/60$ , где n-частота вращения ведущей шестерни /мин-1/, z- число зубьев ведущей шестерни). Вследствие даже небольших неточностей изготовления или неточностей установки характер спектра также может сильно меняться.

4. Оборудование, на котором проводились измерения, не допускало бесступенчатого изменения частоты вращения привода. Это сильно ограничивало возможности анализа спектров шума.

С целью расширения возможностей анализа были проведены замеры собственных частот вала-шестерни и зубчатых колес обеих пар из чугуна.

Для этого детали вывешивались на упругой связи. Производилось их ударное возбуждение и акселерометром считывались спектры собственных частот. Собственные частоты деталей пар из ВЧ приведены в таблице 5, а спектры собственных частот представлены на рис. 7, д – 7, з.

**Таблица 5 – Собственные частоты деталей чугунных пар, Гц.**

Деталь	Колесо №1	Шестерня №1	Колесо №2	Шестерня №3
Собственная частота, Гц	1450		1456	
	2337*	2018	2337*	2662*
	3693*	3893*	3050*	4931*
	4518*	4731*	3712*	
			4518*	

\* Частотная характеристика, соответствующая применяемому способу крепления акселерометра (с помощью магнита), остается линейной приблизительно до 2000 Гц. Составляющие с частотой выше этого диапазона могут не приниматься в расчет, т.к. мощность высокочастотных составляющих ниже, а погрешность, налагаемая способом крепления акселерометра при 5000 Гц, составляет около +10 дБ.

Полученные данные (таблица 5) позволяют сделать предположение о наличии в спектре шума пары 1-1 собственных частот колеса (1450 Гц) и вала-шестерни (2018 Гц) – рис. 7, и. Следует отметить отсутствие в явном виде в спектре шума второй пары собственных частот сопряженных колес – рис. 7, к.

#### **Выводы:**

1. Деформированный чугун при работе имеет уровень звукового давления меньше на 1-3 дБА, чем литой. Это объясняется, вероятно, вытягиванием графита в волокна, при огибании которых звуковые волны гасятся более интенсивно, чем при огибании компактных включений в литом чугуне. Определенную роль оказывает, вероятно, формирование после штамповки металлической матрицы с увеличенным числом дефектов кристаллического строения.

2. Деформированный ковкий чугун при работе на 1-3 дБА тише деформированного высокопрочного. Это связано с более разветвленной формой графита в ковком чугуне. Определенную роль в снижении уровня шума может иметь сочетание в металлической матрице количества бейнита и аустенита.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Исследование прочности и пластичности чугунов в горячем состоянии / Дудецкая Л.Р., Покровский А.И. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, серыя фізіка-тэхнічных навук. Беларусь. г.Минск: Изд. «Наука и техника». - 2000. - № 4. - С.51-55.
2. Промышленное опробование технологии получения ответственных автомобильных деталей из деформированного чугуна / Дудецкая Л.Р., Покровский А.И. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, серыя фізіка-тэхнічных навук (научный журнал). Беларусь. г.Минск: Изд. «Наука и техника». - 2003. - № 2. - С.47-53.
3. Structure Formation of Iron During Hot Plastic Deformation and Development of Technology for Production of High-Quality Items / Pokrovsky A.I. // Metallurgy (Journal of Technological Faculty of University of Zagreb). Croatia. Zagreb: Croatian Metallurgical Society. - 2006. (July/September), vol.45. - № 3. - P.201.