

Отримано результати розподілу усадкової пористості в литих деталях блок-картера двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). На основі їх співставлення з розподілом залишкової напруги, зроблено висновок про вплив усадкової пористості на формування залишкової напруги та їх локалізації в тілі литої деталі. Встановлено технологічні фактори, що суттєво впливають на формування залишкової напруги, та запропоновано конструкторсько-технологічні заходи щодо їх мінімізації

Ключові слова: залишкова напруга, напружено-деформований стан литої деталі, блок-картер

Получены результаты распределения усадочной пористости в литых деталях блок-картера двигателя внутреннего сгорания (ДВС). На основе их сопоставления с распределением остаточных напряжений, сделан вывод о влиянии усадочной пористости на формирование остаточных напряжений и их локализации в теле литой детали. Установлены технологические факторы, существенно влияющие на формирование остаточных напряжений, и предложены конструкторско-технологические мероприятия по их минимизации

Ключевые слова: остаточные напряжения, напряженно-деформированное состояние литой детали, блок-картер

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, СУЩЕСТВЕННО ВЛИЯЮЩИХ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИТЫХ ДЕТАЛЯХ МАШИН

О. В. Акимов

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

В. И. Алёхин

Кандидат технических наук, доцент*

П. С. Пензев

Аспирант*

А. В. Дяченко*

E-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

А. М. Овчаренко*

*Кафедра литейного производства

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua

1. Введение

Литые детали машиностроительного назначения отличаются той особенностью, что избежать наличия остаточных напряжений в них на этапе их изготовления представляет собой трудную практическую задачу. Причины формирования напряженного состояния достаточно много и они обусловлены как тепловыми и физико-химическими процессами, протекающими на этапе кристаллизации сплава в литейных формах, так и гидродинамическими и механическими факторами, влияющими на этапе заполнения литейной формы расплавом. Более того, влияние оказывает и химический состав сплава, который, сам по себе, является фактором, оказывающим опосредованное влияние на вышеназванные причины формирования остаточных напряжений в литых деталях ДВС. Если попытаться системно посмотреть на способы предотвращения, снижения или устранения остаточных напряжений, то следует выделить два подхода, – конструкторский и технологический. Конструкторский подход предполагает разработку оптимальной в некотором смысле конструкции отливки, в которую заложены рациональные решения по технологии литейной

формы. Технологический подход предполагает использование специальных технологических приемов на этапе изготовления сплавов или после полного затвердевания отливки. Применение современного инструментария CAD/CAM/CAE-систем позволяет не рассматривать данные два подхода дифференцированно, а решать задачу конструкторско-технологической подготовки производства параллельно. Это обеспечивает возможность существенного сокращения времени освоения новых изделий и предполагает учет максимально возможного количества влияющих факторов до воплощения результата в производстве. Безусловно, такой интегрированный подход актуален, однако его практическая реализация сопряжена с решением ряда задач, ответы на которые не очевидны. Речь идет о принятии того или иного оптимального конструкторского или технологического решения, причем до сих пор не последнюю роль в этом играет субъективный фактор, выражаемый в знаниях и умениях проектировщика. Очевидно, что подобная ситуация не является достаточно приемлемой, т. к. предоставляемый функционал современных CAD/CAM/CAE-систем остается лишь инструментом, оптимальность же получаемых решений целиком

и полностью зависит от субъекта принятия решений. Таким образом, исследование проблемы, связанной с целенаправленным выбором конструкторско-технологических решений при проектировании литых деталей машиностроительного назначения, является актуальным.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

При рассмотрении вопроса о целенаправленном выборе конструкторско-технологических решений при проектировании литых деталей машин следует заметить, что многие современные оптимальные конструкции наталкиваются на технологические ограничения, накладываемые на этапе их изготовления. При этом погрешности, вызванные технологическими факторами, могут оказывать влияние на эксплуатационные характеристики машин, в конструкции которых используются такие литые детали. Примерами этого могут быть детали гидрообъемно-механических трансмиссий, влияющих на динамику машин [1–4], детали двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [5, 6], бронированных машин, для которых вопросы прочности литых деталей являются важнейшими [7], деталей турбокомпрессоров [8] и т. д.

Рассмотрение путей решения проблем, связанных с учетом в конструкции литых деталей погрешностей, внесенных на этапе их изготовления, в первую очередь этапе технологических процессов литья, предполагает использование CAD/CAM/CAE-систем. Так, в цикле работ [9–12] показаны возможности повышения качества фасонных отливок на основе компьютерного моделирования процессов заливки литых форм. Целью такого моделирования является прогнозирование и определение вероятного образования дефектов в теле отливки, не проводя при этом экспериментов на практике, а используя программные продукты Solid Works и LVMFlow.

При рассмотрении задач минимизации остаточных напряжений в технологической плоскости, в первую очередь рассматривают либо процессы термической обработки – для предотвращения последствий реализации литейных технологий, либо процессы модифицирования сплавов – для снижения рисков формирования остаточных напряжений на этапе реализации литейных технологий. В последнем случае стараются оптимальным образом подобрать модификатор за счет сочетания в его составе графитизирующих и легирующих карбидообразующих элементов, влияющих на физико-химические процессы формирования микроструктуры сплава [13]. При этом обязательно процесс модифицирования, совмещаемого таким образом с легированием, рассматривают также в качестве фактора, существенно влияющего на повышение механических свойств сплава [14, 15].

Таким образом, говоря о необходимости выявления технологических факторов, существенно влияющих на формирование напряжений в литых деталях машин, следует учитывать многомерность представления такой задачи.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является выявление существенных технологических факторов с точки зрения влияния на формирование остаточных напряжений в литых деталях машиностроительного назначения.

Для достижения этой цели рассматривались следующие задачи:

- компьютерное моделирование процессов заполнения литейных форм расплавом на примере блок-картера ДВС;
- экспериментальное определение величины остаточных напряжений при использовании Fe-Si модификатора.

4. Материалы и методы исследования факторов формирования остаточных напряжений на примере блок-картера

4. 1. Исследование процессов заполнения литейных форм

Для исследования была выбрана конструкция созданного в КП «Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению» автомобильного дизеля 4ДТНА1 (4ЧНА-1 8,8/8,2) [16], на основе которой разрабатывалась технология кокильного литья блок-картера (рис. 1).

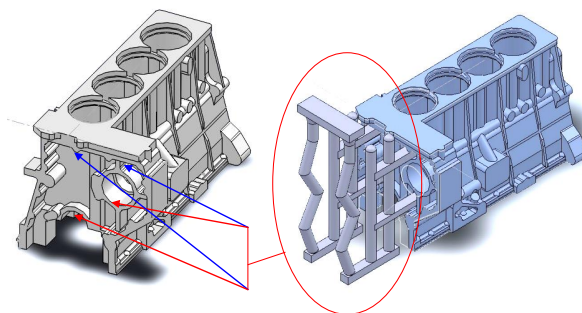


Рис. 1. Конструкция блок-картера дизеля 4ДТНА1 и технология литейной формы для ее изготовления (показаны места подвода питателей литниково-питающей системы)

Характерной особенностью технологического решения являлось использование многоярусной литниково-питающей системы. Параметры ячеек конечно-элементной сетки для моделирования задавались следующими: размер ячейки – 3,7 мм, количество ячеек – 7 672 320 шт.

Назначение граничных условий для материалов отливки и технологической оснастки выполнялось путем разбиения сборки на отдельные компоненты: материал отливки блок-картера – АК5М ГОСТ 1583-93 (ДСТУ 2839-94), материал технологической оснастки – Сталь 45, СЧ20. На формообразующие части кокиля наносилась кокильная краска толщиной 0,2 мм с теплопроводностью $\lambda=0,3$ Вт/м·К. Предусматривался предварительный подогрев технологической оснастки до $t=250\div 280$ °С.

Вероятность формирования остаточных напряжений закладывается еще на этапе заполнения формы

расплавом и главных причин здесь две: торможение усадке со стороны литейной формы и неравномерный отвод тепла от различных частей формы, что может выражаться также в нарушении принципов направленной кристаллизации.

Результат моделирования показал, что скорость движения расплава при выбранном техническом решении по оформлению кокиля в процессе заполнения формы в отдельно взятых частях не достигала критических значений $V_{кр} < 0,8$ м/с. Данные результаты моделирования дают возможность понять, что движение расплава в форме можно считать удовлетворяющим следующим требованиям: проходя через элементы литниковой системы, расплав не приобретает турбулентный характер движения; заполнение формы происходит без превышения критических скоростей (рис. 2).

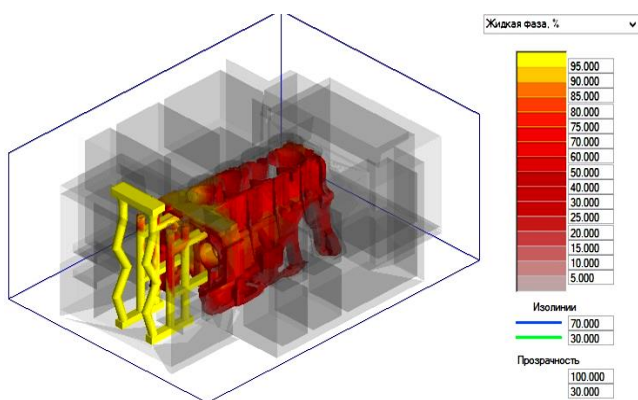


Рис. 2. Переход из жидкой в твердую фазу в процессе охлаждения детали в кокиле

При таком фактическом заполнении формы распределение по объему отливки газоусадочной пористости соответствует приведенному на рис. 3.

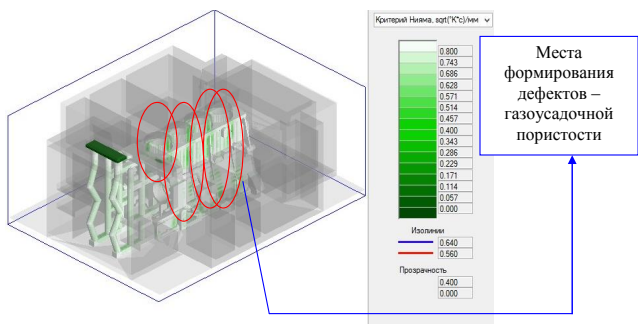


Рис. 3. Места расположения дефектов газоусадочного характера

Дефекты усадочного характера могут являться концентраторами напряжений в конструктивных элементах литой детали, поэтому при наличии их в ответственных местах детали требуются дополнительные технологические факторы воздействия, которыми могут быть модифицирование расплава, совершенствование технологических элементов литейной формы и правильно подобранные режимы термической обработки.

4. 2. Формирование остаточных напряжений в блок-картере из серого чугуна при использовании Fe-Si модификаторов и способы их уменьшения

Целью данных исследований являлось определение фактических данных по термическим напряжениям в базовом чугуне СЧ20 ГОСТ1412-85, которые могут быть использованы как мера сравнения для испытания других сплавов при изготовлении литых деталей блок-картера. Чугун модифицировали Fe-Si модификатором и определяли металлографическим анализом количество перлита в микроструктуре, максимальное значение которого при отсутствии свободного цементита позволяет считать полученный при этом результат оптимальным. Наличие же мелкодисперсного графита при этом также дает основание полагать, что механические свойства будут высокими. На рис. 4 представлены результаты такого анализа по содержанию перлита в микроструктуре.

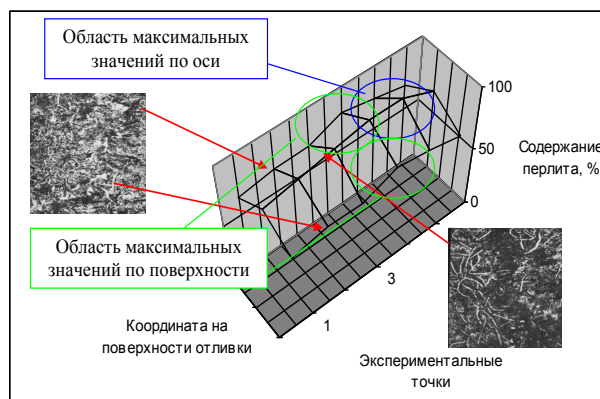


Рис. 4. Содержание перлита в чугуне, залитого по базовой технологии и модифицированного ферросилицием

Повышение механических свойств за счет регулирования микроструктуры обеспечивает возможность снижения массогабаритных характеристик литых деталей за счет уменьшения толщин их стенок, т. е. технологические режимы модифицирования непосредственно влияют на конструкторские решения. Однако при этом следует учитывать, что вследствие торможения усадке в процессе кристаллизации вероятность формирования остаточных напряжений возрастает. Это означает, что достигаемый эффект повышения механических свойств может сводиться «на нет», т. к. вследствие наличия остаточных напряжений возможно образование трещин в литых деталях. Это подтверждают результаты исследований формирования усталостных трещин в зонах, совпадающих с распределением остаточных напряжений, для литых блок-картеров из серого чугуна, модифицированного Fe-Si лигатурой (рис. 5).

Величины относительной деформации в таком чугуне составляют $\epsilon = (-41 \cdot 10^5) - (-81 \cdot 10^5)$ МПа. Наибольшее торможение усадке создается со стороны стержней, поэтому рациональным конструкторским решением является целенаправленное изменение конструкции стержня и стержневых знаков (рис. 6, 7).

Для подтверждения существенного влияния данного конструкторско-технологического решения вы-

полнялись промышленные испытания – в опытной партии, изготовленной с изменениями в технологии изготовления стержней, величина относительной деформации составила $\epsilon = (-45 \cdot 10^5) - (-107 \cdot 10^5)$ МПа. В комбинации с последующей технологией отжига эта величина изменяется еще более значительно, при этом величина остаточных напряжений минимизируется, что подтверждают результаты выполненного тензометрирования (рис. 6, 7).

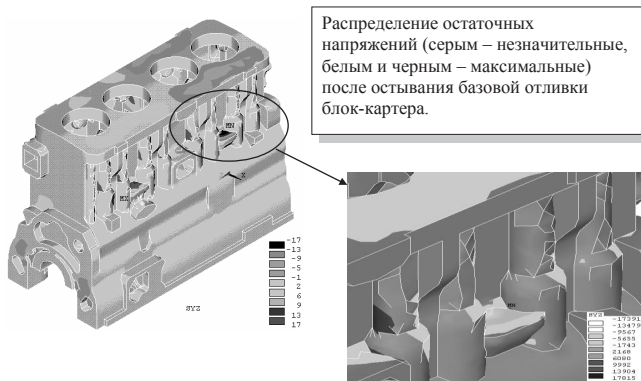


Рис. 5. Зоны максимальной интенсивности остаточных напряжений (совпадают с зоной возникновения усталостной трещины) на конечно-элементной модели отливки блок-картера

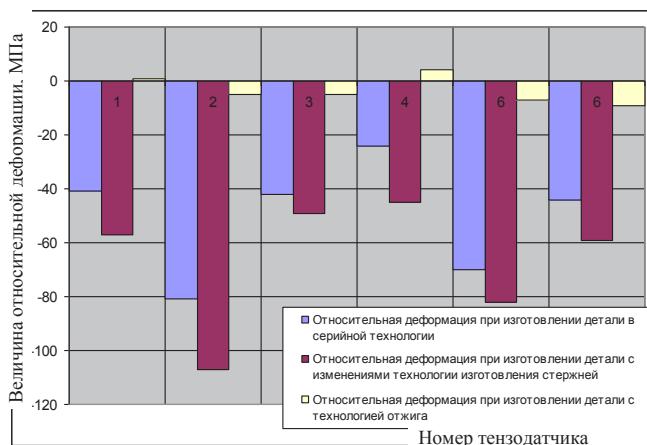


Рис. 6. Результаты тензометрирования по определению величины относительных деформаций

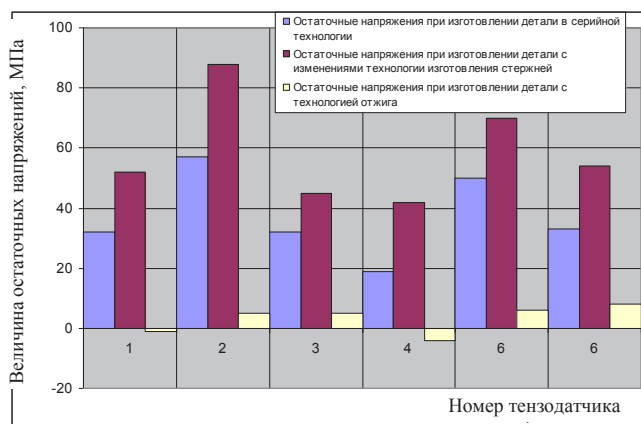


Рис. 7. Результаты определения величины остаточных напряжений

5. Обсуждение результатов выявления остаточных напряжений и факторов, влияющих на их снижение

Анализ мест расположения дефектов и его сопоставление с местом подвода металла показал, что наиболее подвержены усадочным явлениям зоны, расположенные в центральной части литого блок-картера (рис. 3). Именно в этих местах в процессе фазового перехода формируется наибольшее торможение усадке со стороны стержней. Дефекты такой природы являются концентраторами напряжений в конструктивных элементах литой детали, а, значит, могут оказать влияние на прочностные характеристики в процессе эксплуатации. При этом результаты компьютерного моделирования тепловых и гидродинамических процессов литья могут быть использованы для формирования граничных и начальных условий в процессе моделирования напряженно-деформированного состояния литого блок-картера. Наличие подобного рода дефектов приводит к тому, что реальная доля брака литого блока-картера может составлять 5–6 % от годного литья, оцениваемого по вероятности образования усадочной пористости в критических местах конструкции. Устранение проблемы возможно применением комплексного подхода, включающего в себя следующие мероприятия:

- подбор модификатора и режимов модифицирования, обеспечивающих требуемый ход процессов графитизации, в зависимости от химического состава базового сплава;
- изменения конструкции литниковой системы как фактора, влияющего на протекание гидро- и газодинамических процессов в момент заполнения формы расплавом;
- изменением конструкции стержней с целью уменьшения торможения усадке, особенно в наиболее критичных местах литой детали;
- выбором режимов термической обработки, обеспечивающих минимизацию остаточных напряжений.

В подтверждение состоятельности этих мероприятий, как факторов минимизации НДС в литых деталях блок-картера, могут говорить полученные на основе опытных промышленных плавок результаты, приведенные на рис. 5–7. На основании них можно сделать обоснованный вывод об изменении и модуля упругости, и относительной деформации, и величины остаточных напряжений.

6. Выводы

В результате проведенных исследований была выполнена идентификация технологических факторов, влияющих на величину остаточных напряжений, обеспечивает принципиальную возможность корректировки в ходе самого процесса проектирования, в частности, относящейся к изменениям твердотельной и электронной моделей. Среди таких факторов могут быть выделены: несовершенство литниковой системы и конструкции стержней, закладываемых на этапе проектирования технологии литейной формы; неправильный выбор материала литой детали, нерациональный выбор модификаторов и режимов модифицирования; отсутствие комплексного подхода к выбору рационального конструкторско-технологического решения. Последнее предполагает необходимость со-

гласования всех этапов изготовления литых деталей: параллельного конструкторско-технологического проектирования и необходимости учета всех технологических пределов – от плавки и выпечной обработки

сплава до термообработки готовой детали. Реализация такого подхода обеспечивает снижение остаточных напряжений в литых деталях машиностроительного назначения.

Литература

- Самородов, В. Б. Основные параметры гидрообъемно-механических трансмиссий, работающих по схеме “дифференциал на выходе” [Текст] / В. Б. Самородов, А. И. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 7 (57). – С. 4–12. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/4049/3715>
- Самородов, В. Б. Основные параметры гидрообъемно-механических трансмиссий, работающих по схеме “дифференциал на входе” [Текст] / В. Б. Самородов, А. И. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 2, № 7 (56). – С. 21–24. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3753/3513>
- Самородов, В. Б. Результаты экспериментального исследования процесса торможения колесного трактора «FENDT 936 VARIO» [Текст] / В. Б. Самородов, А. И. Бондаренко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 3, № 2 (17). – С. 54–59. doi: 10.15587/2312-8372.2014.26215
- Самородов, В. Б. Результаты моделирования процесса разгона трактора-аналога «БЕЛАРУС 3022 ДВ» с гидрообъемно-механической трансмиссией [Текст] / В. Б. Самородов, А. И. Бондаренко // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 2, № 1 (10). – С. 11–15. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/12950>
- Чайнов, Н. Д. Двухуровневая система моделей прочностного анализа шатунов форсированных дизелей. Т. 2 [Текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. / Н. Д. Чайнов, А. Б. Матисен, М. А. Салтыков, Л. Л. Мягков // Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин. – Самара, 2003. – С. 468–469.
- Чайнов, Н. Д. Оценка долговечности крышек цилиндров среднеоборотных дизелей [Текст] / Н. Д. Чайнов, М. И. Раенко, С. П. Мягков // Грузовик. – 2008. – № 12. – С. 17–21.
- Гриценко, Г. Д. Специализированная система автоматизированного анализа прочности и жесткости корпусов легкобронированных машин для выбора их рациональных конструктивных параметров при импульсном воздействии от усилия стрельбы [Текст] / Г. Д. Гриценко, С. Т. Бруль, А. В. Ткачук // Вісник НТУ „ХПИ». Серія : Машинознавство та САПР. – 2006. – № 3. – С. 10–20.
- Акимов, О. В. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС. Ч. 1. Рабочие характеристики. [Текст] / О. В. Акимов, В. А. Петросянц, В. А. Солошенко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1999. – Вып. 30. – С. 48–51.
- Краснокутский, Е. А. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации литой детали в кокиле [Текст] / Е. А. Краснокутский // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 1, № 1 (3). – С. 3–8. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4867>
- Савченко, Ю. Э. Применение компьютерно-интегрированных систем и технологий в производстве поршней [Текст] / Ю. Э. Савченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 1, № 1 (3). – С. 8–13. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4868/4519>
- Сапегина, Е. Н. Использование компьютерно-интегрированных технологий проектирования в литейном производстве [Текст] / Е. Н. Сапегина // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 5, № 2 (7). – С. 61–62. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4850/4501>
- Насырова, В. А. Выявление резервов повышения качества корпусных отливок на основе компьютерно-интегрированного проектирования оснастки [Текст] / В. А. Насырова // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 6, № 2 (14). – С. 41–43. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/19531/17207>
- Demin, D. A. Change in cast iron's chemical composition in inoculation with a Si-V-Mn master alloy [Text] / D. A. Demin // Litejnoe Proizvodstvo. – 1998. – Vol. 6. – P. 35.
- Demin, D. A. Complex alloying of grey cast iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko // Litejnoe Proizvodstvo. – 1998. – Vol. 10. – P. 18–19.
- Demin, D. A. Optimization of the method of djustment of chemical composition of flake graphite iron [Text] / D. A. Demin, V. F. Pelikh, O. I. Ponomarenko. Litejnoe Proizvodstvo. – 1995. – Vol. 7-8. – P. 42–43.
- Техніко-економічне обґрунтування необхідності державної підтримки у виконанні інноваційно-інвестиційного проекту «Розроблення та впровадження у виробництво малолітражного автомобільного дизеля потужністю 100 – 175 к.с. подвійного призначення (Слобожанський дизель)» [Текст]: монографія / за ред. Ф. І. Абрамчука, О. В. Грицока, І. А. Дмитрієва. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 164 с.