



УДК 669.154

Поступила 16.02.2016

ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ CHOICE OF MATERIAL AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF CASTING

Л. И. КУПРИЯНОВА, О. М. ШИКУРОВ, научный руководитель А. Н. Крутилин, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 65

L. I. KUPRIYANOVA, O. M. SHIKUROV, research supervisor A. N. Krutilin, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.

В результате проведенной работы выбрали недефицитную сталь для изготовления отливки «Сектор звездочки экскаватора Камацу», которая широко используется как износостойкая сталь, работающая в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Проведено математическое моделирование процесса заполнения и затвердевания отливки, которое подтверждает правильность выбора технологии, отвечающей получению отливки без брака.

As a result of the carried out work abundant type of steel was chosen for casting production of asterisk of the excavator «Kamatsu». This type of steel is widely used as the wearproof steel working in the conditions of abrasive and shock – abrasive wear. Mathematical modeling of process of filling and hardening of casting was done and it confirmed a choice of the technology to produce casting without faulty parts.

Ключевые слова. Упрочнение, износостойкость, выбор материала, математическое моделирование, разработка технологии.

Keywords. Hardening, wear resistance, choice of material, mathematical modeling, development of technology.

Эксплуатация деталей машин, их долговечность во многом связаны с износостойкостью материалов, из которых они изготовлены. Механизм износа различен, поскольку он может быть вызван разными причинами: трением механических деталей друг о друга, царапанием твердых частиц о поверхность детали, воздействием внешней среды (ударное воздействие, воздействие струй жидкостей или газов и др.). Требования, предъявляемые к используемым материалам и их свойствам, различны и определяются реальными условиями эксплуатации деталей.

Большое количество деталей, работающих в условиях трения, абразивного и ударно-абразивного износа, получают в виде отливок с использованием различных литейных технологий. В этом случае дополнительными факторами, влияющими на характер износа и эксплуатационную стойкость деталей, являются технологические параметры литья той или иной отливки. При разработке технологии термической обработки отливок необходим учет реальной структуры и фазового состава отливки.

В настоящее время для деталей, работающих в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания, используются углеродистые, легированные стали и чугуны.

Для правильного и эффективного использования существующих материалов требуется точное представление о физико-механических процессах, протекающих при трении и износе с учетом реальных условий эксплуатации.

В литературе встречается много работ, посвященных характеру изменения структуры поверхностных слоев материалов в зависимости от условий их работы. В условиях ударно-абразивного изнашивания увеличение скорости удара до 3–5 м/с снижает износостойкость сталей различных структурных классов. При более высоких скоростях удара (6–8 м/с) износостойкость сталей повышается. С увеличением скорости удара происходит интенсивная пластическая деформация металла, ведущая к упрочнению поверхностного слоя. Энергия удара играет свою роль в процессе износа, с увеличением энергии удара характер зависимости удельного износа стали от скорости удара остается прежним, однако коли-

чественно при увеличении энергии удара износ возрастает. Увеличение скорости удара оказывает более сильное влияние на удельный износ, чем увеличение энергии удара [1].

У сталей перлитного и мартенситного классов при низкой пластичности и высокой твердости ударно-абразивный износ происходит в результате хрупкого выкрашивания отдельных микрообъемов поверхности соударения. Стали аустенитного класса изнашиваются в результате многократной пластической деформации, ведущей к упрочнению поверхностного слоя, наклепу и усталостному разрушению, при этом глубина упрочненного слоя сталей аустенитного класса на порядок выше. Поэтому при выборе материала деталей необходимо учитывать режим нагружения.

Из наиболее известных износостойких сталей, обладающих высокой износостойкостью при трении с давлением и ударами, следует отметить сталь Г13Л (сталь Гатфильда), содержащую 1,13% С и 13% Мп. Обычно эта сталь используется как в деформированном, так и в литом состоянии. Механические свойства литой стали после закалки: $\sigma_b = 780\text{--}980$ МПа, $\sigma_{0,2} = 255\text{--}390$ МПа, $\delta = 40\text{--}50\%$, НВ = 180–220. Высокая износостойкость стали, несмотря на низкую твердость, объясняется ее склонностью к наклепу при эксплуатации. Сталь имеет высокий порог хладноломкости. На сопротивление износу оказывает влияние превращения части аустенита в мартенсит ($\approx 1,5\%$), основную роль в упрочнении при эксплуатации отводят деформированию аустенита, что обеспечивает создание особой дислокационной структуры. Высокая вязкость аустенита, его прочность и сопротивление износу дают возможность эффективно использовать эту сталь для деталей, работающих в условиях ударно-абразивного износа (детали камнедробилок, траки гусениц тракторов, крестовины и др.) [2].

Образование оптимального количества мартенсита в ходе изнашивания отвечает наилучшему «приспособлению» структуры поверхностного слоя и определяет его самоупрочнение в ходе эксплуатации. Максимальная износостойкость достигается в случае реализации двух механизмов: деформационного упрочнения аустенита и получения оптимального количества мартенсита деформации.

Режим и условия изнашивания, определяющие величину энергетического воздействия, напряженное состояние, возникающее при контактном воздействии абразивных частиц с поверхностью, оказывают значительное влияние на интенсивность протекания фазовых и структурных превращений в сталях с различной стабильностью аустенита. Существенную роль играет содержание углерода в мартенсите. Соответственно в сталях с повышенным содержанием углерода как эффект упрочнения от мартенситного превращения, так и эффект деформационного упрочнения – намного выше.

В работе [3] исследовали новый для работы в условиях абразивного изнашивания материал – среднелегированную сталь, упрочненную выделениями дисперсной второй фазы. Этот принцип упрочнения сталей для работы в условиях абразивного изнашивания является весьма эффективным, обеспечивая получение высокой стойкости материала в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания.

Получение структуры с равномерно распределенными дисперсными карбидами *V*, образующимися при закалке с изотермической выдержкой, вызывает увеличение сопротивляемости пластической деформации при вдавливании абразива в поверхность и приводит к равномерному деформированию без появления различного рода дефектов в малых локализованных объемах металла, взаимодействующего с абразивом при изнашивании и соответственно повышает износостойкость.

Повышение долговечности быстроизнашивающихся деталей может быть достигнуто путем применения Fe-C-Cr-V-сплавов, в которых реализован эффект композиционного упрочнения. Под композиционным упрочнением понимается упрочнение за счет объемного армирования матрицы сплава карбидной фазой в виде дендритообразного каркаса, за счет чего Fe-C-Cr-V-сплавы обладают высоким комплексом механических и противоизносных свойств. Количество карбидной фазы для каждого вида основы литых Fe-C-Cr-V-сплавов соответствует верхней и нижней границе диапазона содержания углерода, в котором реализован эффект композиционного упрочнения.

В случае изнашивания при трении о высокотвердые абразивные частицы основным механизмом изнашивания сплавов является микрорезание поверхностей абразивными частицами, при трении о кварцевые частицы – совместное протекание микрорезания и пластического деформирования при значительном возрастании последнего с увеличением содержания карбидной фазы. При изнашивании сплавов с мартенситно-аустенитной и мартенситной матрицами ударом об абразивную поверхность определяющим процессом является хрупкое отделение частиц износа. При ударно-абразивном изнашивании сплавов с аустенитной матрицей важными являются процессы пластического передеформирования микрообъемов основы.

Наиболее благоприятной с точки зрения сопротивления изнашиванию при трении об абразивную поверхность служит мартенситно-аустенитная структура со значительным содержанием карбидной фазы, при ударе об абразивную поверхность – аустенитная структура.

В процессе изнашивания при воздействии абразива возможно протекание структурных превращений в поверхностных слоях сплавов.

В настоящее время разработаны стали [4] с интерметаллидным упрочнением, классифицируемые как высокопрочные мартенситно-старяющиеся стали. Их особенность состоит в том, что вследствие малого содержания углерода (0,03%) при закалке стали получается практически безуглеродистый мартенсит, содержащий большое количество легирующих элементов. При нагреве (отпуске) этих сталей выделяется большое количество высокодисперсных интерметаллических фаз. Примеры таких сталей H18X8HT, H18X12M5T2. Имеются такие сплавы с меньшим содержанием никеля (8–10%). Легирующие элементы (титан и др.) образуют с никелем соединения типа NiTi, Ni₃Ti и др.

Фазовый состав сталей после закалки – безуглеродистый мартенсит и аустенит. Ряд легирующих элементов в аустените имеют большую растворимость, чем в мартенсите, и при нагреве часть легирующих элементов в результате $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения переходит в мартенсит. Основное упрочнение достигается при выделении интерметаллидов.

Анализ превращений, происходящих при нагреве, позволяет говорить о том, что при использовании этих сталей в качестве износостойких при абразивном и ударно-абразивном износе сопротивление износу достигается превращением аустенита в мартенсит, деформированным упрочненным аустенитом и выделением высокодисперсных интерметаллидов.

Уровень прочности мартенситно-старяющихся сталей определяется главным образом количеством высокодисперсного мартенсита, а уровень пластичности – наличием аустенита.

Наилучшее сочетание мартенсита и аустенита – 70–80% мартенсита и 20–30% аустенита. Для деталей, работающих в условиях интенсивного износа, сплавы могут быть использованы в закаленном состоянии. Процесс отпуска будет происходить в процессе эксплуатации в условиях повышенных температур и деформационных воздействий.

Многочисленные исследования и особенности эксплуатации показывают, что большое значение в обеспечении эксплуатационных характеристик деталей машин имеет состояние поверхностного слоя. Придание рабочей поверхности деталей специальных свойств в процессе обработки – одна из главных задач современного машиностроения.

К числу основных направлений интенсификации и создания новых методов обработки относятся использование различных видов энергии (энергии удара, низко- и высокочастотного ультразвуковых колебаний и т. д.), комбинирование нескольких схем обработки, в том числе с использованием различных видов энергии с более высокими и сверхвысокими параметрами, вызывающими качественно новые изменения состояния обрабатываемого материала. Для обеспечения заданных показателей качества деталей при максимальной производительности и минимальной себестоимости необходимо осуществлять целенаправленное управление ходом технологического процесса обработки, а именно, факторами, оказывающими доминирующее влияние на процесс формирования поверхностного слоя деталей.

Нужно создать такие первичные структуры и свойства поверхностных слоев, которые бы в конкретных условиях эксплуатации изменялись в сторону улучшения. Улучшение микрогеометрии поверхностей трения в эксплуатации, как правило, связано с деформированием микрообъектов поверхностных слоев, текстурированием и тонким диспергированием структурных составляющих. Дополнительное упрочнение этих слоев происходит за счет пластической деформации микрообъектов, изменения химического состава в направлении формирования прочных и пластичных вторичных структур, хорошо связанных с основным металлом.

Для повышения сопротивления износу может быть использована и поверхностно-пластическая деформация, которая оказывает существенное влияние на изменение структурно-чувствительных физико-механических и химических свойств в металле поверхностного слоя.

Максимальное упрочнение достигается у каждого металла при определенном давлении деформирующего элемента. У более мягких и пластичных металлов – при меньшем, а у твердых и менее пластичных – при большем давлении. Наибольший прирост твердости имеют металлы со структурой мартенсита закалки, наименьший – сорбитные структуры.

Таким образом, на основании литературных данных для обеспечения высокой износостойкости деталей, работающих в условиях абразивного и ударно-абразивного износа, используются углеродистые

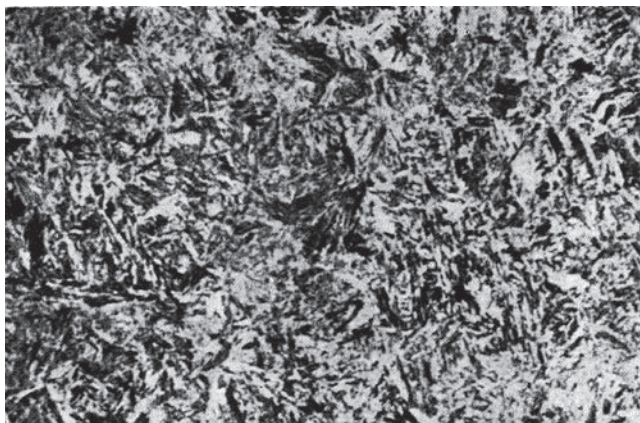


Рис. 1. Структура стали, закаленной и нагретой до 150 °С. Твердость стали составляет 58 ед. HRC



Рис. 2. Бейнит в структуре стали

и легированные стали, структура которых обеспечивает реализацию разных механизмов сопротивления износу в процессе эксплуатации.

Известно, что в низко- и среднеуглеродистых сталях при закалке образуется пакетный мартенсит. Между кристаллами мартенсита находятся прослойки остаточного аустенита толщиной 20–50 нм. Содержание остаточного аустенита в стали ~2%.

Структура стали 45Л в отожженном состоянии – феррит + перлит, $HV = 180$, $\sigma_B = 780$ МПа, $\delta = 15\%$, $a_K = 400$ кДж/м², $T_{зак} = 830–900$ °С. Охлаждение $V_{охл} > V_{кр}$, т. е. холодная вода. Температура начала мартенситного превращения стали 45 $M_n \sim 300$ °С. Поэтому при охлаждении возможно образование сегрегатов углерода в аустените, которые наследуются мартенситом.

Поскольку сталь 45Л не дефицитна и используется как износостойкая, работающая в условиях абразивного и ударно-абразивного износа (детали экскаватора в экспортном исполнении), необходимо установить оптимальный вариант ее термической обработки, обеспечивающий достаточное сопротивление изнашиванию.

Исследованы структура и свойства стали после закалки от температуры 850 и 1000 °С. Структура стали, закаленной от 850 °С, – мелкоигльчатый мартенсит. Твердость стали соответствует 60 ед. HRC. Нагрев закаленной стали до 150 °С производится для рассмотрения структуры, имеющей место при эксплуатации. Поскольку в условиях эксплуатации сталь испытывает силовые (деформация) и температурные (тепловой эффект) нагрузки, то превращения при этом аналогичны превращениям, происходящим при низком отпуске (самоотпуск). Структура стали после закалки при 850 °С и нагреве до 150 °С представлена мелкоигльчатым мартенситом отпуска, образовавшейся ϵ -фазой и высокодисперсными выделениями цементита. При этом мартенсит может деформационно упрочняться за счет ударных воздействий (рис. 1).

При ударно-абразивном износе возможно появление бейнита (рис. 2).

При закалке от 1000 °С образуется крупноигльчатый мартенсит низкой твердости. Структура образца стали, взятого из сектора звена звездочки экскаватора после эксплуатации, представлена на рис. 3.

Сопротивление износу (абразивному и ударно-абразивному) деталей, отлитых из стали 45Л, можно объяснить главным образом упрочнением мартенсита карбидами. Распад аустенита закалки при эксплуатации аналогичен распаду мартенсита при низком отпуске. Вклад превращения остаточного аустенита в мартенсит при его упрочнении не велик, так как его количество незначительно. Такая трактовка сопротивления износу подтверждается тем, что при нагреве закаленной стали до 150 °С твердость сохраняется. Таким образом, механизм, обеспечивающий сопротивление износу, соответствует карбидному.

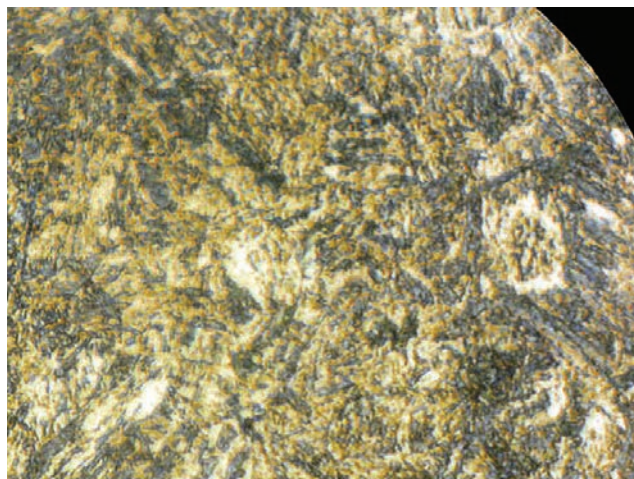


Рис. 3. Структура стали после эксплуатации

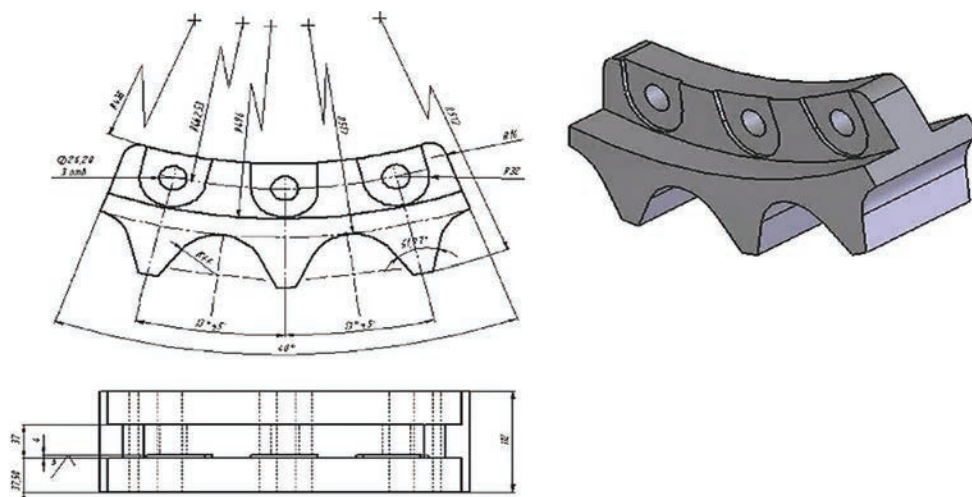


Рис. 4. Чертеж детали и ее трехмерный вид

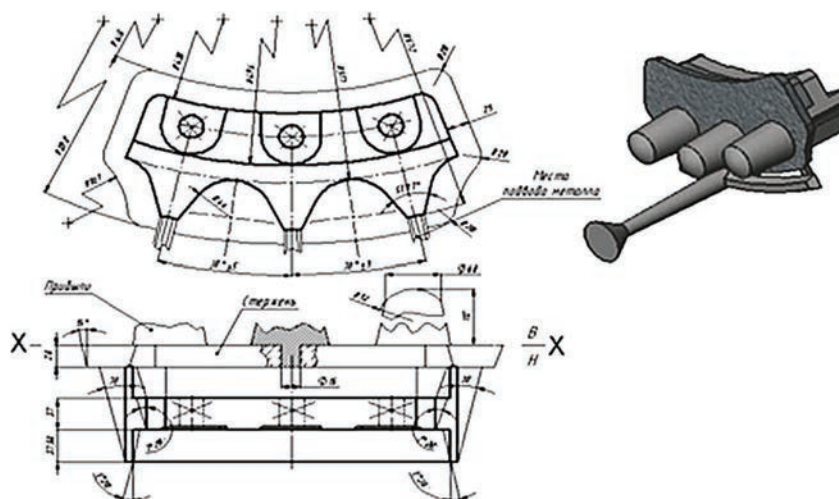


Рис. 5. Литейно-модельные указания

Сталь 45Л может быть использована для отливки деталей, работающих в условиях ударно- и ударно-абразивного износа, после закалки от 850° С. При этом реализуется дисперсионный (карбидный) механизм сопротивления износу.

В качестве объекта исследования выбрана деталь «Сектор звездочки экскаватора «Камацу». На детали (рис. 4) имеется ряд углублений, подлежащих обработке. Но, учитывая то, что размеры обрабатываемых участков невелики, а глубина выемок соответствует 4 мм, целесообразно отказаться от их выполнения непосредственно литьем. В свою очередь это позволит сократить расходы на изготовление модели и снизить себестоимость отливки.

Литейно-модельные указания приведены на рис. 5 (ГОСТ 3212-92).

Построение трехмерной модели этой отливки осуществляли в системе SolidWorks, которая является фактическим стандартом трехмерного твердотельного моделирования и известна на многих предприятиях и проектных организациях всего мира. Система представляет собой мощный инструмент для проектирования сложных деталей, сборок, чертежей, имеет широкий набор средств организации коллективной работы над проектом с применением Internet-технологий, обмена данными, моделирования и др. Модель отливки создается на базе уже созданной модели детали путем прибавления припусков на механическую обработку, формовочных уклонов, литейных радиусов, увеличения размеров отливки на величину усадки. Модели всех элементов литниковой системы (питателей, шлакоуловителей, стояка, воронки, дросселя и др.) создаются отдельно, для возможности дальнейшего редактирования и создания базы данных типовых элементов. Соединение элементов модели ведется в специальном файле «Сборка».

Созданная объединенная трехмерная модель и конечно-элементная сетка передаются в пакет «ПОЛИГОН», где осуществляется моделирование гидродинамики процесса заполнения формы расплавом и процесса кристаллизации отливки. В результате проведенного расчета определены вероятные места

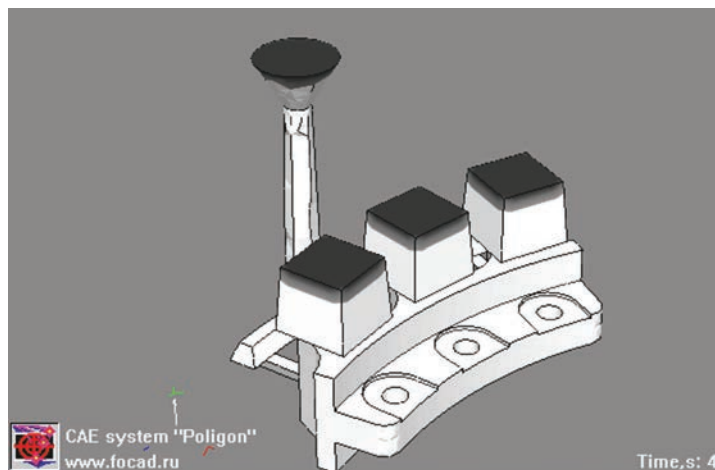


Рис. 6. Результаты моделирования

возникновения брака по усадочным раковинам и пористости. Виртуальное математическое моделирование позволяет предварительно с помощью изменения конструкции отливки, конфигурации прибылей, уменьшения припусков на механическую обработку рассмотреть возможность предотвращения данного вида брака. На основании анализа результатов компьютерного моделирования с помощью «ПОЛИГОН» возможно оптимизировать наиболее важные технологические параметры литья, снизить материальные затраты и время на проектирование и доводку литейной технологии.

Данные по определению мест вероятного образования пористости приведены на рис. 6.

Исходя из результатов моделирования, сделан вывод о соответствии технологии изготовления отливки требованиям, исключающим получение брака в виде пористости.

Таким образом, в результате проведенной работы выбрали недефицитную сталь для изготовления отливки «Сектор звездочки экскаватора «Камацу», которая широко используется как износостойкая сталь, работающая в условиях абразивного и ударно-абразивного износа. Проведено математическое моделирование процесса заполнения и затвердевания отливки, которое подтверждает правильность выбора технологии, отвечающей получению отливки без брака. Технология предусматривает литье в разовые формы с использованием стержней, изготовленных по Hot-Vox-процессу в специально сконструированных разъемных стержневых ящиках.

Литература

1. М а т в е е в с к и й Б. Р. Разработка метода испытания и исследование ударно-абразивного изнашивания сталей при различных скоростях удара: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1980.
2. Г у л я е в А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1981.
3. Ч а й к о в с к и й К. Р. Изнашивание дисперсно-упрочненных сталей при абразивном и ударно-абразивном изнашивании: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1988.
4. Б о д я к о М. Н., А с т а п ч и к С. А., Я р о ш е в и ч Г. Б. Мартенситно-стареющие стали. Мн.: Наука и техника, 1976.

References

- М а т в е е в с к и й В. Р. Razrabotka metoda ispytaniya i issledovanie udarno-abrazivnogo iznashivaniya stalej pri razlichnyh skorostyah udara [The development of the test method and the study of impact-abrasive wear of steels at different impact velocities]. Avtoref. kand. tehn. nauk, Moscow, 1980.
1. G u l j a e v A. P. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981.
 2. C h a j k o v s k i j K. R. Iznashivanie dispersno-uprochnjonnyh stalej pri abrazivnom i udarno-abrazivnom iznashivanii [Wear a dispersion-hardened steels with abrasive and shock-abrasive wear]. Avtoref. kand. tehn. nauk, Moscow, 1988.
 3. B o d j a k o M. N., A s t a p c h i k S. A., J a r o s h e v i c h G. B. *Martensitno-starejushhie stali* [Maraging steel]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1976.