

УДК 621.961.2.073.004

Корнилова А. В.

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ НА ПРИМЕРЕ X12МФ

В настоящее время в России изготавливаются и находят свое применение 107 инструментальных сталей [1], составляющих следующие группы – углеродистые (16 сталей), легированные (33 стали), штамповые (36 сталей), быстрорежущие (22 стали). В отдельную группу входят валковые инструментальные стали (14 сталей). Из всего многообразия инструментальных сталей для изготовления инструмента холодной листовой штамповки (наиболее распространенного вида пластического деформирования металла) применяются (согласно ГОСТам и ТУ) 22 стали (приведены с заменителями в табл. 1).

Таблица 1

Инструментальные стали для холодной листовой штамповки

№	Марка стали	Заменитель	Применение согласно российским ГОСТам и ТУ
1	2	3	4
1	У10 У10А	У11 У12 У12А	Инструмент, который работает в условиях, не вызывающих разогрева рабочей кромки: матрицы для холодной штамповки
2	У13 У13А	–	
3	X12Ф1	X6ВФ X6В3ФМ	Секции кузовных штампов сложной формы, сложные дыропрошивные матрицы при формовке листового металла, матрицы и пуансоны вырубных и просечных штампов со сложной конфигурацией рабочих частей
4	X12МФ	X6ВФ X12Ф1 X12ВМ	
5	X12ВМФ	–	Инструмент с высокой устойчивостью против истирания, гибочные и формовочные штампы, матрицы и пуансоны вырубных штампов, сложные кузовные штампы
6	X12	–	Холодные штампы высокой устойчивости против истирания, не подвергающиеся сильным ударам и толчкам; гибочные штампы, сложные секции кузовных штампов, матриц и пуансонов вырубных и просечных штампов
7	X12ВФ	X12М	
8	40X5МФ	3X2В8Ф	Ответственные детали прессового и штампового инструмента, работающие при повышенных температурах до 500°С.
9	27X2Н2М1Ф	–	
10	8X4В3М3Ф2	–	Ножи гильотинных и других ножниц для резки листового металла
11	8X3	7X3	Инструменты (пуансоны, матрицы) гибочных и просечных штампов
12	7ХГ2ВМФ	–	Вырубной инструмент сложной конфигурации, используемые при производстве изделий из цветных сплавов и мало прочных конструкционных сталей
13	7Г2ВМ	–	
14	ХВГ	9ХС ХГ 9ХВГ ХВС	Пуансоны сложной формы для холодной прошивки преимущественно фигурных отверстий в листовом и полозовом материале

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
15	9ХВГ	ХВГ	Сложные весьма точные штампы для холодных работ, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению
16	6ХС	–	Пневматические зубила и штампы небольших размеров для холодной штамповки, рубильные ножи
17	6ХВГ	–	Пуансоны сложной формы для холодной прошивки преимущественно фигурных отверстий в листовом и полосовом материале, небольшие штампы для горячей штамповки, главным образом, когда требуется минимальное изменение размеров при закалке
18	4ХВ2С	4Х5В2ФС 3Х2В8Ф 4Х8В2 4Х3В8М 4Х3В2М2	Вырубные и обрезающие штампы сложной формы
19	5ХВ2С	6ХВ2С	Штампы сложной формы для холодной штамповки
20	6ХВ2С	6Х3ФС	
21	5Х3В3МФС	-	Матрицы прошивных и формообразующих пуансонов тяжело нагруженного инструмента
22	5Х2МНФ	-	Для крупногабаритных штампов, наборных формовочных и пуансонов

Из них в последнее время широко рекламируется сталь Х12МФ (ГОСТ 5950-2000). Однако механические свойства предлагаемой стали (предел прочности  $\sigma_B$ , вязкость разрушения, параметры кривой усталости, кинетическая диаграмма усталостного разрушения) нигде не определены. Кроме того, четко не определены разрушающие процессы, происходящие в рабочих частях инструмента.

Сложность оценки долговечности разделительного инструмента для холодной листовой штамповки состоит в том, что его эксплуатация практически всегда сопровождается совместным действием двух разрушающих процессов – износа и усталости. Эти процессы взаимодействуют, и на различных этапах эксплуатации штампа (от первой отштампованной детали до его выхода из строя) могут, как ускорять, так и существенно замедлять действие друг друга [2–4]. Часто применяя меры, призванные устранить (уменьшить) влияние одного процесса, ускоряют сопутствующий ему. По статистическим данным наиболее частыми причинами отказа разделительного инструмента являются отказы матриц. В работе [2] показано, что для стандартной однопозиционной матрицы с прямоугольным вырубным отверстием (80 × 60 мм) при штамповке из стали 25 на открытом ненаклоняемом прессе КД2124 силой 250 кН максимальное эквивалентное напряжение в матрице при расположении длинной стороны матрицы перпендикулярно фронту прессы составляет 128 МПа, расчетное значение скорости формирования усталостного дефекта по предлагаемой в [2] методике  $V_y = 1,37 \cdot 10^{-9}$  м / цикл, скорость уменьшения размера матрицы в направлении формирования усталостной трещины  $V_n = 1,35 \cdot 10^{-11}$  м / цикл. На этапе формирования дефекта износ тормозит процесс усталости. Но так как скорость формирования усталостной трещины выше скорости износа ( $V_y > V_n$ ), усталостный дефект все-таки сформируется. Однако здесь возможна ситуация, когда износ за это время приведет к тому, что на деталях, снимаемых со штампа, появится заусенец высоты, большей, чем допускаемая, и штамп выведут из эксплуатации. Такие случаи позволяют утверждать, что износ является единственным предельным

состоянием деталей штампов, и повышать их долговечность следует именно за счет увеличения износостойкости. Например, применением сталей, содержащих хром. Как известно, хром повышает твердость и износостойкость, но снижает вязкость.

До сих пор ни один исследователь не выявил однозначной зависимости качества получаемого изделия от изменения геометрии инструмента вследствие износа. Поэтому в разделительных операциях холодной листовой штамповки стойкость штампов принято оценивать не по износу рабочих частей, а по числу деталей, снимаемых со штампа к моменту появления на них заусенца не допускаемой высоты. Если же заусенец находится в пределах допуска, то штамп остается в эксплуатации вплоть до момента выхода из строя по критерию усталости. Значит, стали для рабочих частей разделительного инструмента должны обладать не только высокими износостойкими свойствами, но и высокими характеристиками сопротивления усталостному разрушению.

Целью работы является проведение серии экспериментов для выяснения, соответствует ли сталь X12MФ сформулированным требованиям.

Для исследования была использована кованая полоса толщиной 80 мм шириной 300 мм средней длиной 1260 мм, изготовленная на Златоустовском Metallургическом заводе. При резке соблюдалась ориентация образцов относительно основных направлений исходной полосы. Подобная ориентация образцов обеспечивает получение технических характеристик по наиболее слабым направлениям и соответственно обеспечивает консервативность получаемых результатов (рис. 1–2).

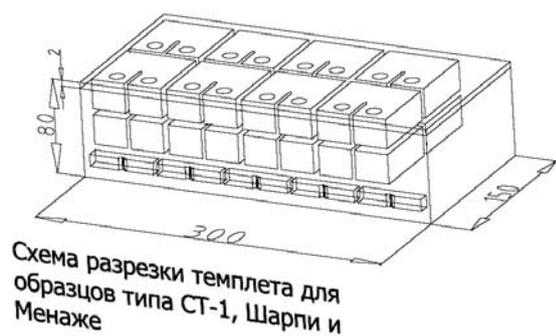


Схема разрезки темплета для образцов типа СТ-1, Шарпи и Менаже



Схема разрезки темплета для образцов для испытания на усталость и растяжение

Рис. 1. Схема разрезки темплета на заготовки для изготовления образцов для ударных испытаний типа I по ГОСТ 9454-78 (типа Менаже) и типа II по ГОСТ 9454-78 (типа Шарпи), а также образцов типа СТ-1 для исследований трещиностойкости

Рис. 2. Схема разрезки темплета на заготовки для изготовления образцов для испытаний на разрыв и усталость

После изготовления образцы были подвергнуты термической обработке по режиму – предварительный подогрев до 650–700 °С, окончательный нагрев до 950–1050 °С, закалка в масло, отпуск 170–190 °С 1,5 часа на воздухе. После обработки образцы были подвергнуты шлифовке и полировке по рабочим поверхностям. Были проведены металлографические исследования. Исследования проводили с помощью светового металлографического микроскопа «Ахiorplan» и растрового электронного микроскопа «CamScan». Оценку микроструктуры проводили по ГОСТ 5950–2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общетеchnические условия». Сталь X12MФ относится к ледебуритному классу, так как в литом виде первичные карбиды, выделяющиеся во время затвердевания, образуют ледебурит (эвтектику). Крупные вытянутые карбиды размером 5–20 мкм в длину являются карбидами хрома. Наряду с ними в структуре также присутствуют мелкодисперсные карбиды хрома размером 1–2 мкм, а также цементит. При нагреве выше перлитного превращения

вторичные карбиды растворяются, и аустенит насыщается хромом. В процессе закалки происходит мартенситное превращение, но, так как оно не заканчивается при комнатной температуре, в структуре также может присутствовать и остаточный аустенит. Таким образом, после термообработки – закалки и отпуска в структуре стали X12МФ могут присутствовать следующие фазы: остаточный аустенит, мартенсит и карбиды разных видов.

Механические испытания на разрыв проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТ 1497-84 «Металлы. Испытания на растяжение». Исследования проводились на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 4 мм. Испытания проводились при температуре + 20 °С на универсальной машине «Шенк-Гидропульс». Продольная деформация образцов измерялась экстензометром DSA 25/10. Диаграмма испытания на растяжение показана на рис. 3. Максимальное значение  $\sigma_B$  составило 1422 МПа, среднее 1364 МПа.

Ударные испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 «Металлы. Испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». Можно отметить, что значения энергии удара, определенной на образцах Шарпи (среднее значение – 2,84 Дж), практически лежат на уровне нижнего шельфа температурных зависимостей энергии удара, принятой в нормах атомного машиностроения, где нижний шельф, определенный по массиву испытаний сталей разных марок при низких температурах (до жидкого азота), принят в настоящее время как 2,5 Дж.

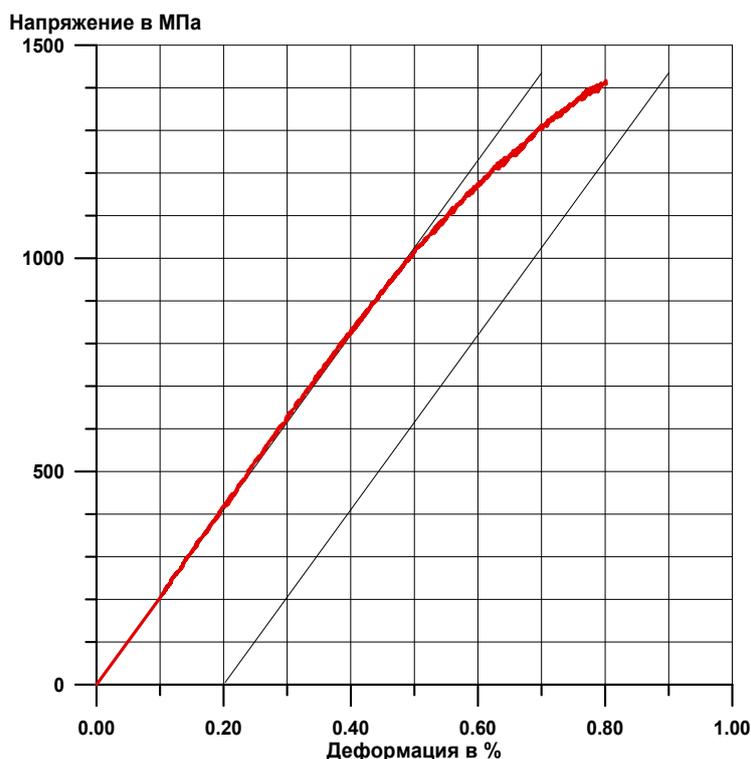


Рис. 3. Диаграмма испытаний на растяжение образцов из стали X12МФ

Эксперимент по определению параметров кривой усталости проводился при коэффициенте асимметрии цикла  $R = 0$ . Предел выносливости на базе  $2 \cdot 10^6$  составил 650 МПа. Соотношение  $\frac{\sigma_0}{\sigma_B} = 0,46$ . Обычно такое соотношение соответствует отношению предела выносливости к пределу прочности при коэффициенте асимметрии цикла  $R = -1$ . Предел выносливости при отнулевых циклах по статистическим данным в 1,5 раза выше предела выносливости при  $R = -1$ . Полученные данные указывают на предельно низкое сопротивление исследуемой стали усталостному разрушению.

Были проведены испытания на определение вязкости разрушения. Среднее значение  $K_{IC} = 24 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ . На рис. 4 показана кинетическая диаграмма усталостного разрушения. Диаграмма имеет большой разброс даже на Перисовском линейном участке. Вид диаграммы так же подтверждает низкое сопротивление усталостному разрушению.

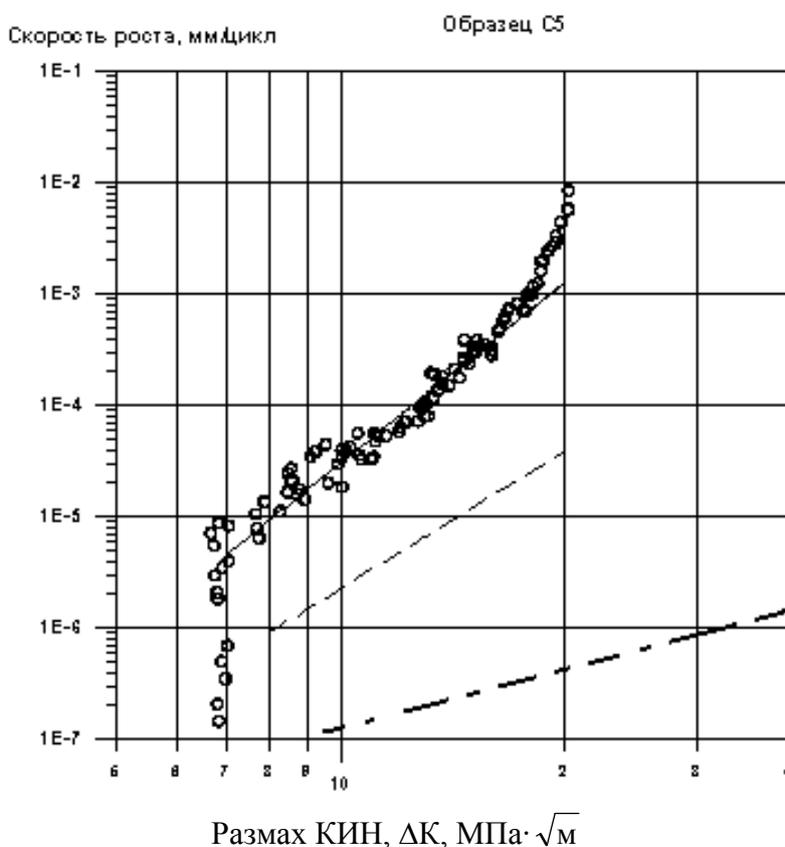


Рис. 4. Кинетическая диаграмма испытаний образца № С5:

сплошная линия – аппроксимация второго участка уравнением Пэриса при  $C = 1,25E-10$ ,  $n = 5,39$ ; штриховая линия – приведенная для сравнения аппроксимация второго участка уравнением Пэриса для стали 10ХСНД при  $C = 1,75E-10$ ,  $n = 4,11$ ; штрихпунктирная – для стали У8 при  $C = 2,785E-11$ ,  $n = 3$

Исследования трещиностойкости (вязкости разрушения) проводились на прямоугольных компактных образцах для испытаний на внецентренное растяжение толщиной 25 мм (образцах типа 3 по ГОСТ 25.506-85 или СТ-1). Ориентация всех образцов – ТЛ. Испытания проводились на универсальной сервогидравлической испытательной машине «Шенк-Гидропульс». Выращивание начальных усталостных трещин для исследований статической трещиностойкости и исследования циклической трещиностойкости выполнялось при частоте нагружения 20 гц, синусоидальной форме цикла, коэффициенте асимметрии  $R \approx 0,1$ , и при комнатной температуре. При циклических испытаниях с помощью АЦП и компьютера IBM/PC регистрировались максимальная и минимальная нагрузки цикла и максимальное и минимальное раскрытие берегов надреза, которое измерялось экстензометром DSR 10/20. Управление процессом испытания и обработка полученных данных производились по программе DADN56B, разработанной фирмой «Карл Шенк АГ» в соответствии с требованиями стандарта ASTM E 647-93. При статических испытаниях регистрировались текущие значения нагрузки и раскрытие берегов надреза с начала нагружения до разрушения образца. Для выбора режима нанесения начальных усталостных трещин на компактных образцах внецентренного растяжения СТ-1 были проведены предварительные испытания. Образец № С2 был нагружен до разрушения. Диаграмма нагружения приведена на рис. 5. Разрушение образца

произошло при нагрузке 25 кН. Номинальные напряжения в вершине механического надреза (без учета концентрации напряжений) составляли при разрушении 188 МПа (напомним, что предел прочности составляет 1364 МПа).

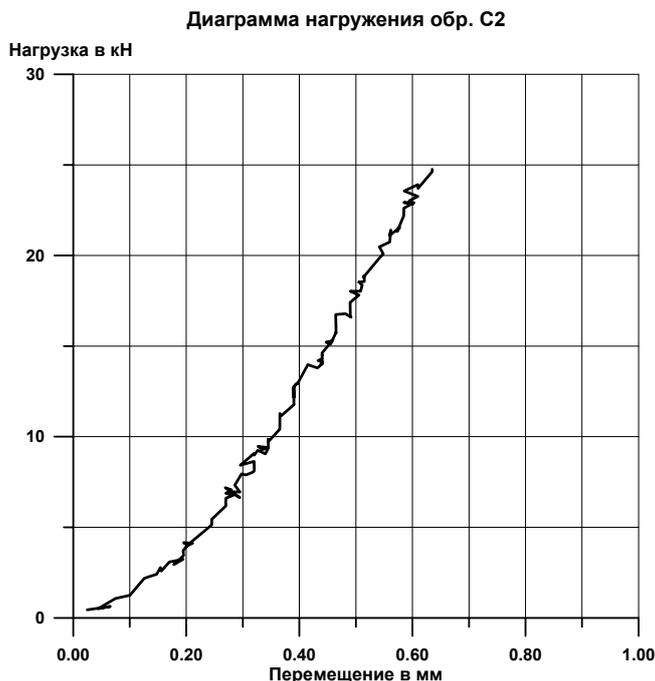


Рис. 5. Диаграмма нагружения образца С2

Для оценки трещиностойкости (вязкости разрушения) в образце № С3 была выращена усталостная трещина. Длина трещины (суммарная длина = механический надрез + усталостная трещина)  $a$  составила 26,5 мм. Максимальная циклическая нагрузка на конечном этапе выращивания трещины,  $P_{max}$ , составляла 10 кН. После подготовки образец был испытан на статическую трещиностойкость согласно методике, регламентированной ГОСТ 25.506–85. Диаграмма «нагрузка-раскрытие берегов надреза» приведена на рис. 6.

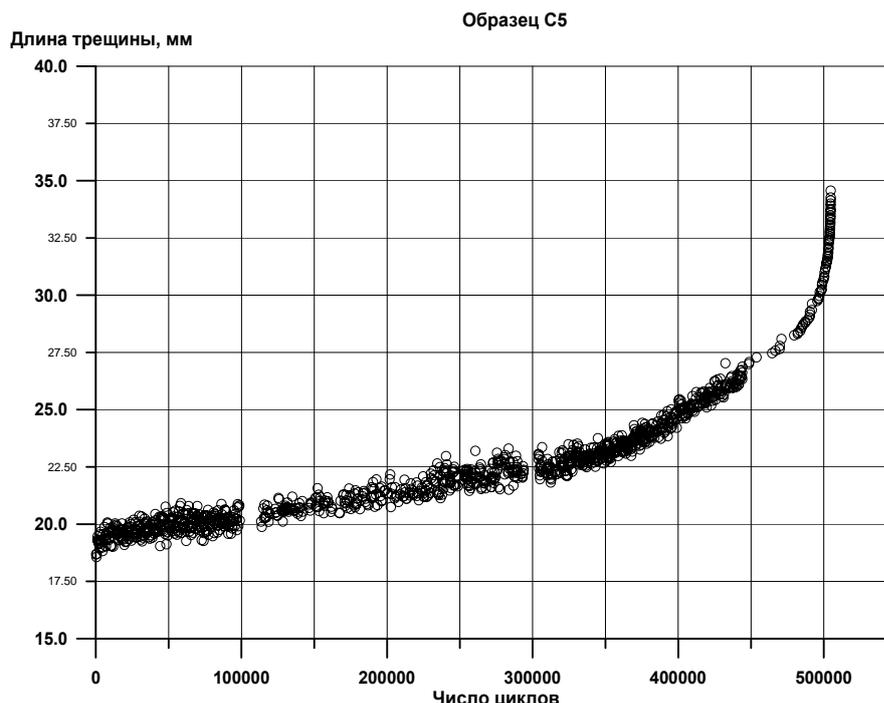


Рис. 6. Диаграмма «длина трещины – число циклов» образца № С3

Максимальная нагрузка при разрушении составила 14,2 кН. Полученная диаграмма соответствует диаграмме III типа по ГОСТ 25.506–85. Нагрузка PQ, используемая для вычисления значения величины критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , равна 14 кН. Значения величины критического коэффициента интенсивности напряжений для образца № СЗ –  $K_{IC} = 26,6 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ . Можно отметить, что на изломе образца невозможно отделить зону циклического выращивания трещины от зоны хрупкого долома при испытании на трещиностойкость.

Данным можно сделать выводы: сталь X12MФ склонна к хрупкому разрушению (подтверждается разрушениями инструмента в заводских условиях), имеет очень низкие усталостные характеристики. Хотя уже доказан факт, того что основным разрушающим процессом в рабочих деталях разделительных штампов является усталость металла. А не износ. Нельзя однозначно признать полезность применения этой стали для рекомендуемых в марочнике целей – профилировочные ролики сложной формы, секции кузовных штампов сложной формы, сложные дыропрошивные матрицы при формовке листового металла, матрицы и пуансоны вырубных просечных штампов со сложной конфигурацией рабочих частей. Стали для этих целей должны обладать оптимальным сочетанием твердости и вязкости. Упор только на один аспект не позволяет достичь оптимального результата.

### ВЫВОДЫ

1. Перед тем как рекомендовать новые стали, новые виды термо- и поверхностных обработок необходимо проводить прямые износоусталостные испытания. Химический состав, стандартные механические характеристики и меры, косвенно оценивающие характеристики поверхностных слоев (например, микротвердость), не могут являться критерием пригодности сталей для изготовления инструмента холодной листовой штамповки.

2. Предлагается разработать и в дальнейшем закрепить руководящими документами обязательный комплекс износоусталостных экспериментов (на базе трибофатических международных стандартов, принятых, в том числе, и на территории Российской Федерации), необходимых для признания пригодности или непригодности сталей в исследуемом состоянии для изготовления рабочих деталей штампов.

3. В дальнейшем применить данный комплекс экспериментов ко всем предлагаемым в настоящее время сталям для холодной листовой штамповки (табл. 1) и по результатам исследований сократить список до 5–6 наименований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Государственное научно-техническое изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961. – 510 с.
2. Корнилова А. В. Определение долговечности инструмента для холодной листовой штамповки по критериям трибофатики / А. В. Корнилова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2006. – № 2. – С. 88–94.
3. Корнилова А. В. Некоторые подходы к оценке долговечности инструмента для холодной листовой штамповки / А. В. Корнилова // Кузнечно-штамповочное производство ОМД. – 2007. – № 1. – С. 16–23.
4. Корнилова А. В. К вопросу о применимости стали X12MФ для разделительных штампов / А. В. Корнилова // Сборник трудов «Неделя металлов». – 2006. – С. 67–74.

Корнилова А. В. – д-р техн. наук, проф. МГТУ «Станкин».

МГТУ «Станкин» – Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва, Россия.

E-mail: ANNA44@yandex.ru