



*The review of the literature, considering the problems of working capacity of hot stamps, is carried out and the factors determining their fail for the reason of fault of forming parts because of resistance of tool steels is presented and also carrying out of measures for solving of the problem is recommended.*

*The metal research aspects of using of the existing and creating of new tool steels for solving of arising problems on the basis of complex alloying, and also due to carrying out of new kinds of thermal treatment at preventive works are considered.*

В. Н. ФЕДУЛОВ, БНТУ

УДК 621.74

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ И СОЗДАНИЯ НОВЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ГОРЯЧЕГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Проблема стойкости горячей формообразующей оснастки является комплексной и многоплановой задачей. Оптимальное решение проблемы требует синтеза металлургических, технологических, конструктивных и эксплуатационных разработок. В металловедческом аспекте принципиальное решение имеют два самостоятельных направления:

- а) разработка инструментальных сталей и сплавов;
- б) оптимизация режимов и методов их термической и химико-термической обработки.

Широкому и эффективному внедрению новых марок стали и оптимальных режимов термообработки препятствуют отсутствие надежных методов прогнозирования работоспособности штамповых материалов по результатам лабораторных исследований, а также неполный учет специфических условий эксплуатации формообразующей оснастки. Для анализа работоспособности сталей при самых разнообразных сочетаниях эксплуатационных параметров необходимо, во-первых, выделить ведущего механизма, изнашивания оснастки и, во-вторых, наличие обоснованной классификации основных факторов, оказывающих определяющее влияние на интенсивность и закономерность изнашивания рабочей поверхности оснастки, а также условий, способствующих ее катастрофическому разрушению [1–9].

Сложные и своеобразные условия эксплуатации инструмента горячего деформирования обуславливают развитие в его поверхностных слоях различных по характеру разрушающих процессов. Тем не менее, для каждого конкретного вида инструмента всегда выделяется один, который оказывает решающее воздействие, выводя инструмент из строя: износ истиранием, смятие рабочей поверхности и разгар (образование разгарных трещин).

Износ за счет истирания в условиях работы кузнечно-штампового инструмента (воздействие высоких и изменяющихся во времени давлений и температуры) следует рассматривать с двух позиций: причина выхода из строя штампа и фактор, активизирующий процессы и оказывающий воздействие на деформационные изменения в поверхностном слое гравюры и разгарообразование [4]. Металлофизической стороной процессов, определяющих износ за счет истирания, является совокупность следующих явлений: пластическая деформация (упрочнение), диффузия и структурные изменения (разупрочнение), микро- и макроразрушения. Процентное соотношение штампов, выбракованных по причине истирания рабочей поверхности, сравнительно невысокое. Ранее были разработаны методика и установка [4] для исследования износа штамповых сталей в различных температурно-силовых условиях. Выявлена существенная разница на начальном периоде износа сталей. Продолжительность периода приработки минимальна для сталей типа 3Х2В8Ф и 5ХЗВ3МФС и значительно возрастает при переходе к сталям типа 7ХЗ и 5ХНМ. Установлены три области внешних температурно-силовых воздействий, обеспечивающих развитие ведущего типа износа. Для первой области (температура разогрева 80–350 °С) характерен наиболее низкий уровень износа (микрогеометрия поверхности С7–С8; доля поверхности с глубинным разрушением до 20–30%). Для этой области свойственно образование стабильных оксидных структур, затрудняющих выход ювенальных участков на поверхность износа и образование узлов схватывания. Наиболее широкую область по температуре разогрева для окислительного износа и наименьший уровень разрушения в ней имеют теплостойкие стали типа 5ХЗВ3МФС и 3Х2В8Ф. Сталь 7ХЗ имеет меньшую

(с точки зрения температуры разогрева поверхности) протяженность окислительной зоны. Существенно уступает этим сталям сталь 5ХНМ. Для второй области (нагрев поверхностных слоев до 400–600 °С) характерен более высокий уровень износа, а разрушение рабочих поверхностей более значительно из-за увеличения коэффициента трения (тепловой износ). Образование узлов схватывания в этом случае превалирует над защитной ролью окислительных процессов. Сталь 5ХНМ здесь еще более существенно уступает сталям 5ХЗВЗМФС и 3Х2В8Ф и менее значительно стали 7ХЗ. В третьей области (температура нагрева поверхностных слоев – выше 600 °С) износ протекает в условиях макропластической деформации (смятия) поверхностных слоев. В этих условиях теплостойкость испытываемых сталей оказывает решающее влияние на уровень износа.

Исследование состояния поверхностных слоев в процессе испытания сталей на износ истиранием показывает существенное влияние химического состава и структуры стали на износостойкость в рассмотренных областях температурного разогрева [4, 7, 9]. Влияние введения легирующих элементов (содержание до 2%) в среднеуглеродистую сталь в области окислительного вида изнашивания характеризует повышение износостойкости и позволяет расположить их в ряд (по мере убывания): Si, W, Cr, Mo, Al, Mn, Ni, Cu. Эта же последовательность сохраняется и при испытаниях образцов одинаковой твердости исследуемых сталей, достигаемой за счет соответствующего изменения условий отпуска образцов. Влияние на износостойкость образцов сталей, легированных этими же элементами в условиях интенсивного смятия поверхностного слоя, носит иной характер (ряд по мере убывания): Al, W, Mo, Cu, Cr, Mn, Ni, Si. Для влияния структурного фактора на износостойкость образцов стали характерно наличие или отсутствие избыточной карбидной фазы: присутствие на поверхности трения карбидов и повышение их дисперсности обуславливает увеличение износостойкости. Установлено увеличение износостойкости сталей и при повышении легированности  $\alpha$ -твердого раствора. Присутствие в стали остаточного аустенита также влияет на работоспособность поверхности трения горячештаптовых сталей. Комплексное легирование среднеуглеродистой стали для штампов горячего деформирования с целью повышения износостойкости и механических свойств предполагает наличие в ее составе таких элементов, как Cr, Mo, V, Al, Si и, конечно, W. Диффузионные покрытия различных типов способствуют существенному повышению износостойкости штамповых сталей [8, 10] за счет уменьшения температуры разогрева трущихся поверхностей. Исследование материала контратела показывает, что контактирование штамповых сталей

при горячей штамповке с более мягкими сталями сопровождается интенсификацией процессов схватывания за счет адгезии, а с более твердыми сталями приводит к смятию гравюры. Наличие смятия или поломок штампов, когда стойкость их наиболее низкая, свидетельствует о чрезмерно тяжелых условиях эксплуатации штампа или о несоответствии выбранной марки стали требованиям эксплуатации.

Работоспособность инструментальных сталей в тяжело нагруженных объектах определяется основными закономерностями разупрочнения контактных поверхностей и объемов горячих штампов в условиях изменения температуры в процессе работы и характеризуется разгаростойкостью материала (зарождение и развитие горячих трещин) [2]. В условиях переменных температурно-силовых нагрузок высокой интенсивности возможно образование трещин I и II рода. К I роду следует относить трещины, обусловленные чисто силовым фактором, механизм возникновения которых связан с флуктуационным разрывом межатомных связей и зависит от соотношения между приложенными напряжениями и пределом прочности материала в переменных температурных полях. Они могут появиться после первого цикла или после ограниченного числа нагрузочных циклов при температуре разогрева рабочей поверхности заметно ниже предшествовавшей температуры технического отпуска стали. Ко II роду относят собственно разгарные трещины, образующиеся за счет протекания процессов термической и термомеханической усталости. Различить их весьма трудно и можно только с участием профессионального специалиста. Образование разгарных трещин связывают с протеканием специфических структурных изменений: формирование «белых» и светлотравящихся структур, вызванных реакциями химического и структурно-фазового расслоения в контактных объемах инструмента, находящихся в переменных температурно-напряженных полях. Разгаростойкость соответственно возрастает при переходе от полутеплостойких к теплостойким сталям. Наиболее значительное повышение разгаростойкости легированных хромом штамповых сталей вызывает введение в их состав алюминия (в малых количествах), никеля, кремния и вольфрама [5]. По некоторым данным [7], наибольшую по сравнению с другими структурами разгаростойкость имеют стали с высоколегированной перлитной мелкопластинчатой структурой. Для перлитной структуры смена пластинчатой структуры зернистой также вызывает снижение разгаростойкости. Разгарные трещины обычно образуются на тех участках рабочих поверхностях штампов, где происходит продолжительный контакт с деформируемым металлом поковки, отсутствует течение металла и наблюдаются концентрации напряжений в момент работы штампа. Стойкость

штампов в значительной мере зависит от высоты штампуемой поковки: при уменьшении высоты увеличивается стойкость штампа из-за снижения теплового воздействия на вертикальные стенки [11].

Статистические данные, полученные в результате наблюдения за стойкостью горячих штампов на ряде предприятий, позволили установить следующие закономерности:

- смятие гравюры штампа как основной причины выхода из строя характерно для молотовых штампов и высоконагруженных прессовых штампов;

- роль истирания как причина выбраковки характерна для прессовых штампов с малым деформирующим усилием;

- роль разгарообразования в стойкости штампов характерна для случаев штамповки на прессах с высоким усилием при обработке труднодеформируемых материалов.

Для повышения стойкости штампов горячего деформирования весьма важным фактором является чистота металла по неметаллическим включениям, содержанию серы, фосфора [12], а также содержанию остаточного водорода, что в условиях штампового производства может увеличить стойкость в 2,0–2,5 раза.

Пресс-формы литья под давлением алюминиевых и медных сплавов выходят из строя в основном по причинам эрозионного размыва и образования разгарных и магистральных трещин [13, 14]. Процесс потери прочности материала пресс-формы во многом определяется его взаимодействием с расплавом металла: химическим воздействием, диффузионным проникновением, вымыванием продуктов взаимодействия и наличием циклических термических напряжений. Первые три фактора в значительной мере могут быть «заторможены» применением химико-термической обработки поверхности и операции смазки [13], функцией, которой является создание диффузионного (изолирующего) барьера между материалом формы и жидким металлом. Выбор нужного состава смазки является отдельной проблемой и требует значительных технологических поисков и материальных затрат.

Под воздействием химических реакций и циклических термических напряжений образуются поверхностные трещины или трещины разгара. Роль циклического термического воздействия заключается на первом этапе эксплуатации формы в провоцировании процессов диффузии элементов в поверхностном слое материала формы и их перераспределении: оттеснении от поверхности хрома и ванадия [14] и, на наш взгляд, обезуглеороживании поверхности, а также в создании концентраторов термических напряжений. Образование разгарной сетки начинается [14] с появления отдельных относительно равномерно распре-

деленных розеткообразных очагов разрушения. Появление их и характер распределения свидетельствуют о том, что они возникают на стыках границ зерен. Границы зерен обнажаются в процессе механической обработки стали и тем самым выводят на поверхность рабочей части формы ослабленные участки поликристаллического конгломерата. Дальнейшее развитие трещин и их направление определяется сочетанием локального напряженного состояния и ориентировкой границ зерен. Характерной особенностью разгарной сетки у пресс-форм является относительно высокая степень равномерности распределения трещин по поверхности термоциклирования и глубине. Один из факторов, существенно влияющих на склонность металла к разгарному разрушению, — наличие неметаллических включений и их распределение. На наш взгляд, существенными факторами, снижающими разгаростойкость сталей, являются наличие в ее структуре связанного водорода (гидридов), а также крупнодисперсных первичных карбидов. Первые под термическим воздействием выделяют атомарный водород, который стремится к поверхности и располагается в напряженных местах, что в конечном итоге и обеспечивает зарождение трещины. Вторые служат очагами образования локальных напряжений на своей границе с основной фазой на рабочей поверхности формы, так как их теплопроводность значительно отличается от теплопроводности основной фазы, а форма границ карбидов с фазой на поверхности формы напоминает многогранник. Под воздействием циклических тепловых процессов происходит увеличение полостей разрушения за счет локальной концентрации напряжений, а также увеличение их числа. Интенсивность этих процессов в значительной степени зависит от изменения твердости стали под действием термоциклических напряжений и увеличения уровня напряжений вблизи концентраторов. После появления разгарной сетки создается вполне обоснованное впечатление несвязанности поверхностных дефектов с очертаниями развивающейся сетки, однако такая связь прослеживается и проявляется в степени развитости отдельных участков сетки, в изменении направления их распределения как по поверхности, так и в глубину и более раннем выкрашивании участков поверхностного рабочего слоя.

Увеличение твердости материала рабочих частей формы и создание неоднородной структуры повышают ее чувствительность к концентрации и локализации напряжений в процессе термоциклирования, формированию первичных трещин, появлению вторичных трещин, а также к образованию быстроразвивающихся магистральных трещин.

В процессе эксплуатации пресс-форм отмечаются три весьма четко выраженных периода [14]:

а) отсутствуют заметные признаки разгарного разрушения рабочей поверхности, хотя прогрессирует искажение геометрических размеров;

б) появление различных признаков микроразрушения при все еще интенсивно возрастающем формоизменении геометрических элементов;

в) уменьшение степени формоизменения, сопровождающееся усилением макротрещинообразования.

Производственники обычно проявляют беспокойство по поводу стойкости оснастки только в третий период, хотя наблюдение форм в первые два периода, и в особенности в первый (примерно 0,5 срока эксплуатации), оказывает большое влияние на увеличение общего срока ее службы. В первые два периода необходимо проводить организационно-технические мероприятия по повышению стойкости, в том числе и проведение дополнительных термических обработок как пресс-форм литья под давлением, так и штампов для горячего формообразования. Об этом пойдет речь ниже.

Таким образом, основные пути повышения стойкости технологической оснастки горячего формообразования заключаются, во-первых, в совершенствовании их температурных, силовых и скоростных условий эксплуатации, во-вторых, в подборе и использовании смазочных материалов, в-третьих, в выборе или создании марки инструментальной стали и режима его термической (химико-термической) обработки, в-четвертых, своевременном проведении планово-предупредительных и восстановительных работ.

Что касается третьего пути повышения стойкости горячих штампов, то в части использования штамповых сталей на предприятиях республики дело обстоит следующим образом. Применяется в основном сталь 5ХНМ, так как в качестве материала штамповок (поковок) используются в основном стали типа Ст.20, 30, 35, 40, 45, 40Х и т.п. Разогрев поверхности гравюр в штампах обычно составляет не более 400–450 °С, а окислительный износ в основном характеризует и определяет стойкость штампов. Химико-термическая обработка рабочих поверхностей штампов из стали 5ХНМ неэффективна, смазки при проведении операции горячей штамповки не применяются. Повышение стойкости штампов в данном случае можно достигнуть проведением дополнительного легирования стали 5ХНМ. Как уже отмечалось, в условиях окислительного износа в состав штамповой стали следует вводить в первую очередь кремний. На наш взгляд, содержание кремния должно составлять 0,9–1,2%. Для повышения теплостойкости в составе стали необходимо увеличить содержание молибдена до 0,6–1,0% и ввести ванадий в количестве 0,2–0,3%. Легирование кремнием, повышение содержания молибдена и введение ванадия позволяют повысить легированность перлитной основы стали, так как

будет возможно повышение температуры нагрева под закалку в масло до 960–1000 °С вместо 850–860 °С, что при последующем отпуске обеспечит получение теплостойкого и износостойкого перлита отпуска за счет вторичного твердения [15]. Одновременно высокая износостойкость при повышенных температурах обеспечивается сохранением в структуре стали первичных карбидов небольших размеров и равномерно распределенных по сечению рабочей поверхности. Суммарный эффект от проведенных мероприятий: твердость стали – 49–52 HRC<sub>3</sub>, ударная вязкость – 0,5–0,75 МДж/м<sup>2</sup>, теплостойкость (620 °С, 4 ч) – 42–44 HRC<sub>3</sub>. Такая сталь для штампов может быть подвергнута химико-термической обработке: карбонитрирование в обмозках, что еще весьма значительно повысит стойкость гравюры штампов. Проведение полного комплекса мероприятий для некоторых предприятий позволило бы решить и проблему горячей штамповки алюминиевых и медных сплавов, а также проведение планово-предупредительных ремонтов технологической оснастки: введение операции восстановления стойкости гравюры штампов после выработки ими 0,2–0,8 срока эксплуатации. Заключается эта операция в следующем. После охлаждения штампа и очистки проводят его двойной отпуск по примеру работы [16]: первый – при повышенной температуре в течение 2–4 ч и совмещают его с карбонитрированием в обмозке гравюры для восстановления содержания С и N в поверхностном слое, второй – при более низкой температуре в течение 3–10 ч для распада остаточного аустенита, образовавшегося в поверхностном слое при эксплуатации (наличие светлых пятен в структуре). Особенно значительный эффект обеспечивается для штампов из сталей 4Х5МФС, 4Х5В2ФС, 5Х3В3МФС, 3Х2В8Ф, которые не проходили химико-термическую обработку перед началом эксплуатации или подвергались газовому азотированию, так как весьма значительно снижается вероятность образования разгарных трещин, а также восстанавливается износостойкость гравюры.

Что же касается рабочих частей пресс-форм литья под давлением алюминиевых сплавов, то в основном для их изготовления применяют на предприятиях республики сталь 4Х5МФС, реже 5Х3В3МФС и даже 5ХНМ. Для матриц и пуансонов из стали 4Х5МФС основным фактором, определяющим срок службы инструмента, являются разгарные трещины. Повышение стойкости здесь можно достичь химико-термической обработкой рабочих поверхностей за счет насыщения их азотом или азотом и углеродом при проведении отпуска, что зачастую выполняется на предприятиях с серийным или массовым производством.

Повышения стойкости пресс-форм за счет использования легирующего комплекса инструментальной стали можно достичь за счет измельчения структуры, в первую очередь, первичных

карбидов и пластин перлита. Это может быть решено при помощи снижения содержания Cr или исключения его из состава стали и легирования в значительных количествах W, Mo, Ni, Si. В первом случае, например, использование стали 38ХНЗМФ для стаканов литейных машин на ОАО «Мотовело» и стали 12ХВЗФ для рабочих частей пресс-форм с одновременным проведением карбонитрирования в обмазках рабочей поверхности позволило повысить стойкость инструмента в 3 раза. Перспективным направлением является использование бесхромистой стали, например, 40ГС2М2Ф (собственная разработка), для которой характерно повышение теплостойкости за счет значительного измельчения элементов структуры, отпускостойчивости и возможности применения химико-термической обработки при отпуске. Наличие в составе стали значительного количества Mo и Si и отсутствие Cr позволяют снизить количество и увеличить дисперсность первичных карбидов и перлитных составляющих, что повышает разгаростойкость, так как снижается вероятность возникновения термических напряжений между структурными составляющими при термоциклировании. Ванадий также способствует измельчению структуры стали и совместно с Si и Mn обеспечивает повышение вязкости и пластичности, а также повышение отпускостойчивости [15] за счет эффекта вторичного твердения. Высокое содержание кремния в стали значительно уменьшает возможность химического взаимодействия стали с алюминием, затормаживает диффузию углерода от поверхности и тем самым снижает вероятность размыва рабочей поверхности наряду с применением химико-термической обработки и соответствующего смазывающего диспергента. Все это является «ноу-хау» и обеспечивает выигрыш примерно в 2,0–2,5 раза.

Для рабочих элементов пресс-форм после выработки ими 0,5 и 0,8 ресурса необходимо проведение профилактических мер, заключающихся в очистке от загрязняющих поверхность элементов (в основном остатки алюминиевого сплава) и проведения операции карбонитрирования в обмазке при температуре не выше предшествовавшего отпуска в течение 2–4 ч [17].

Таким образом, рассмотрены металлургические аспекты применения инструментальных сталей для технологической оснастки горячего формообразования и показаны основные пути повышения стойкости горячих штампов и пресс-форм литья под давлением цветных сплавов. основополагающим принципом при выборе материала инструмента является комплексный подход к рассмотрению проблемы: вещество получаемого изделия – конструкция рабочих частей технологической оснастки и технология изготовления и термической обработки – режимы эксплуатации

технологической оснастки и облегчающие ее системы – профилактические работы.

### Литература

1. Бельский Е.И. Некоторые аспекты повышения эффективности и стойкости стальной металлообрабатывающей оснастки // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки. Мн., 1980. С. 3–5.
2. Трахтенберг В.Ф. Металлофизические аспекты повреждаемости и основные закономерности разрушения контактных объемов тяжело нагруженных горячих штампов // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: Тез. докл. Мн., 1980. С. 5–7.
3. Роголев А.М. Основные пути повышения стойкости штампов горячего деформирования // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: Тез. докл. Мн., 1980. С. 20–22.
4. Бельский Е.И., Пикуло В.М. К вопросу о механизме износа материалов кузнечных штампов // Структура металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1974.
5. Траймак Н.С. Особенности легирования и свойства литых и деформированных инструментальных материалов // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: Тез. докл. Мн., 1980. С. 22–25.
6. Котельников Г.А. Технологическое обеспечение надежности деформирующего инструмента // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: Тез. докл. Мн., 1980. С. 25–26.
7. Лихачев С.А., Стасюлевич В.А. Разгаростойкость и структура штамповых сталей // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: Тез. докл. Мн., 1980. С. 37–39.
8. Комплексное насыщение инструментальных сталей из технологических обмазок / Н.С.Траймак, В.П.Крюков, К.С.Будровский, В.Н.Тарасова // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки деталей машин и инструмента: Тез. докл. Мн., 1977. С. 76–77.
9. Ситкевич М.В. Износостойкость горячештамповых сталей // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки деталей машин и инструмента: Тез. докл. Мн., 1977.
10. Пикуло В.М. Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки горячештампового инструмента // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки деталей машин и инструмента: Тез. докл. Мн., 1977.
11. Лихачев С.А., Траймак Н.С. Влияние геометрических и технологических параметров на разгаростойкость // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки деталей машин и инструмента: Тез. докл. Мн., 1977. С. 84–85.
12. Лихачев С.А., Траймак Н.С. Качество металла и термоусталостное разрушение литых и деформированных инструментальных сталей // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: Тез. докл. Мн., 1980. С. 80–83.
13. Тимофеев Г.И., Архипенков Ю.В. Роль смазок в повышении стойкости пресс-форм литья под давлением // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: Тез. докл. Мн., 1980. С. 71–73.
14. Факторы стойкости форм из стали 45Х5МФС при литье под давлением алюминиевых сплавов / В.А.Стрельский, Е.И.Бельский, И.И.Силин, В.П.Вешняков // Литейное производство. 1975. № 7.
15. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. С. 63–74.
16. Стрельский В.А., Холзаков В.И., Молочков А.В. Влияние повторной термической обработки на разгаростойкость стали 3Х2В8Ф // Изв. вузов. Черная металлургия. 1967. № 11.
17. Ливенцев В.Е., Федулов В.Н. Восстановление рельефа и стойкости рабочих поверхностей изделий с помощью композиционных обмазок // Литье и металлургия. 2004. № 2(30). С. 131–132.