

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГРАВЮРЫ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ХОЛОДНОВЫСАДОЧНЫХ МАТРИЦ

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П.О.Сухого»
г. Гомель, Беларусь

In work results of research of a tension of matrixes for cold volume stamping are considered. It is shown influences of geometry of a formbuilding surface on firmness of the tool. Conditions under which the mechanism of wear of a blanket of an engraving changes are defined. Modernization of a form-building surface is carried out. Firmness of the tool is increased.

В работе рассмотрены результаты исследования напряженного состояния матриц для холодной объемной штамповки. Показано влияния геометрии формообразующей поверхности на стойкость инструмента. Определены условия, при которых изменяется механизм изнашивания поверхностного слоя гравюры. Проведена модернизация формообразующей поверхности. Повышена стойкость инструмента.

Введение

Ограничение стойкости холодновысадочных матриц происходит по причине высоких контактных нагрузок на их рабочие поверхности. Увеличение размеров и массы поковок, а также усложнение их формы, способствует возникновению на гравюре инструмента зон локальной перегрузки. На отдельных участках формообразующей поверхности величина контактных напряжений может достигать 2000 МПа и более [1–3]. Это создает условия для образования микродефектов в поверхностном слое материала матриц. Начальные микротрещины возникают на наиболее нагруженных участках контактной поверхности и, распространяясь, вызывают разрушение материала матриц (рис. 1). Одной из основных причин отказа тяжело нагруженных холодновысадочных матриц является проявление контактной усталости материала. Наиболее значительные повреждения металла возникают в подповерхностном слое в зоне, где наиболее высоки касательные напряжения [4–6]. На механизм распространения трещин контактной усталости оказывают влияние наличие в материале различного рода включений, шероховатость формообразующих поверхностей и уровень контактных нагрузок [7–9]. Зачастую процессы контактной и объемной усталости суммируются, в результате чего в материале распространяются глубокие магистральные трещины. При высоких контактных нагрузках подповерхностные повреждения охватывают достаточно обширные объемы металла, что приводит к отслоению обширных участков гравюры.

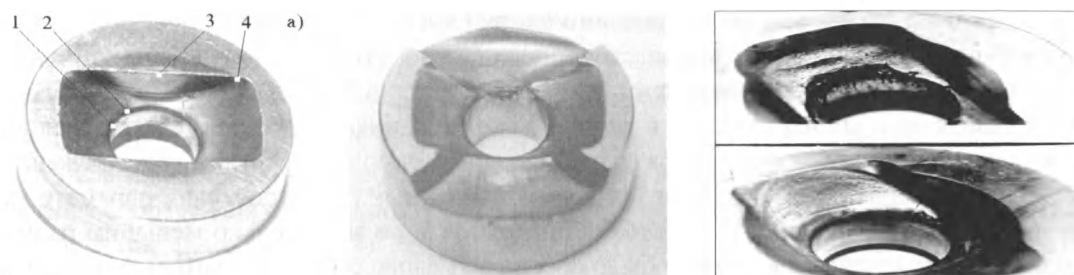


Рис. 1. Характер зарождения (а) и распространения (б) дефектов в материале холодновысадочных матриц прототипов и матрицах с модернизированной формообразующей поверхностью (в) для изготовления болта железнодорожного крепежа М22-8g×75.36 ГОСТ 16017-79. Цифрами указаны зоны максимальных эквивалентных напряжений, возникающих на рабочей поверхности матриц прототипов

Объекты и методики исследований

Объектом исследований являлись матрицы для холодной высадки крупногабаритного крепежа для рельсовых узлов – Болт М22-8g×75.36 ГОСТ 16017-79. Оценку напряженного состояния матриц проводили методом конечных элементов. При построении компьютерной модели учитывали, что инструментальный материал – быстрорежущая сталь Р6М5 после стандартной термообработки разрушается в соответствии с линейной механикой [10]. В связи с этим материал модели считали абсолютно упругим. Узлы сопряженных поверхностей модели матрицы со стороны дна фиксировали по трем направлениям, отражая взаимодействие с проставкой. Со стороны бандажа прикладывали радиальное перемещение величиной 0,2 мм, соответствующее минимальной величине рекомендуемого натяга при запрессовке матриц в обоймы. Измерение величины радиуса сопряжения между формообразующей поверхностью матриц и отверстием под стержень болта осуществляли шаблонами с дискретизацией значений измеряемого параметра 0,05 мм.

Результаты исследований и их обсуждение

Механизм образования трещин контактной усталости определяется уровнем действующих напряжений и величиной коэффициента трения между контактирующими поверхностями. Использование технологических смазок и низкая шероховатость формообразующей поверхности инструмента при холодной высадке поковок позволяет достичь низкого коэффициента трения между материалом заготовки и инструментом. Как правило, подповерхностные дефекты, характерные для контактно-усталостного разрушения материала, возникают при коэффициенте трения, который не превышает 0,2. В этом случае касательные напряжения, ответственные за микропластические деформации, достигают своего максимального значения на глубине нескольких десятых миллиметра от контактной поверхности [6]. В противном случае, при высоком коэффициенте трения, очаг максимальных касательных напряжений перемещается на поверхность. Зона концентрации касательных напряжений при контактом нагружении деталей машин совпадает с областью рабочей поверхности, на которой возникают максимальные эквивалентные напряжения [11]. Это распределение соответствует четвертой энергетической теории прочности и условию Мизеса-Шлейхера, в соответствии с которыми интенсивность касательных напряжений является функцией нормальных, а также эквивалентных напряжений. Эквивалентные напряжения наряду с касательными считаются критерием несущей способности материала при его контактом изнашивании [11, 12].

Анализ напряженного состояния матриц 3-го перехода, окончательно формирующих головку болта рельсовых креплений, показал, что локальная концентрация эквивалентных напряжений возникает в области радиуса сопряжения формообразующей поверхности с отверстием

под стержень болта (рис. 2 а). Их величина достигает значения порядка 5000 МПа, что соизмеримо с предельным значением контактного напряжения, которое выявлено при испытаниях быстрорежущих сталей в условиях всестороннего сжатия [10, 13]. По этой причине в качестве материала для изготовления матриц использовали сталь Р6М5 ГОСТ 19265-73. Высокое значение эквивалентных напряжений в указанной зоне возникает вследствие малой величины радиуса сопряжения между формообразующей поверхностью и отверстием под стержень болта, который на начальном этапе составлял 1,5 мм. Указанный геометрический параметр на изделии может достигать 5 мм. Изготовление инструмента со значительно меньшим радиусом по мнению проектировщиков должно было обеспечить запас стойкости, который определялся бы периодом постепенного изнашивания инструмента до максимально возможного значения. Однако, как видно из рис. 1, механизм разрушения поверхностного слоя при высоких эквивалентных напряжениях характеризуется не постепенным истиранием, а проявлением контактной усталости. Глубокие трещины приводят к образованию объемных питтингов, а также служат источниками для зарождения трещин объемной усталости, приводящих к катастрофическому разрушению инструмента.

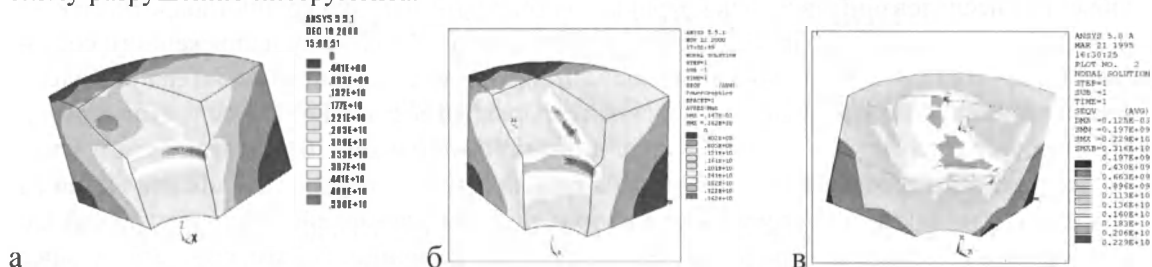


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений (Па) по рабочей поверхности матриц третьего перехода для посадки болта М22-8g×75.36. ГОСТ 16017-79. Радиус сопряжения формообразующей поверхности с отверстием под стержень болта:

а – 1,5 мм, б – 5 мм, в – 5 мм, в последнем случае модель инструмента построена с разгружающими камерами

Очевидным решением, обеспечивающим снижение концентрации эквивалентных напряжений, стала модернизация гравюры инструмента. Как видно из рис. 2 б, в случае изготовления матриц с радиусом сопряжения – 5 мм величина эквивалентных напряжений снижается до 3620 МПа.

Экспериментальные исследования показали, что приращение радиуса сопряжения по мере наработки матриц описывается криволинейной зависимостью (рис. 3). На основании аппроксимации экспериментальной зависимости получено выражение (1), отражающее величину износа по мере наработки инструмента:

$$\Delta R = 3,77E-07N^3 - 0,00026N^2 + 0,0538N \text{ [мм]}, \quad (1)$$

где N – число циклов нагружения матрицы, тыс. циклов.



Рис. 3. Зависимость радиуса сопряжения формообразующей поверхности с отверстием под стержень болта матриц от числа циклов нагружения инструмента

Продифференцировав зависимость 1, получим выражение для скорости изнашивания формообразующей поверхности в рассматриваемой зоне в зависимости от длительности эксплуатации инструмента:

$$V_r = 1,136E-06N^2 - 0,00052198N + 0,0538 \text{ [мм/тыс. циклов]}, \quad (2)$$

где N – число циклов нагружения матрицы, тыс. циклов.

По мере возрастания числа высаженных изделий и абсолютной величины радиуса сопряжения формообразующих поверхностей происходит снижение скорости изнашивания рабочей поверхности инструмента (рис. 4). Решив уравнения (1) и (2) относительно N , и приравняв их, получим зависимость, описывающую влияние величины радиуса сопряжения на скорость изнашивания формообразующей поверхности:

$$V_r = 8,0227E-05R^4 - 0,000385939216R^3 - 0,00366628692R^2 + 0,0101R + 0,0466 \quad (3)$$



Рис. 4. Изменение скорости изнашивания формообразующей поверхности матриц в зависимости от длительности их эксплуатации

Результаты численного исследования показывают, что увеличение радиуса сопряжения формообразующей поверхности с отверстием под стержень болта сопровождается снижением эквивалентных напряжений (рис. 5).

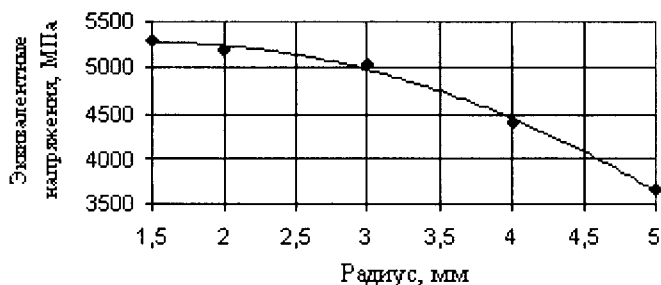


Рис. 5. Зависимость эквивалентного напряжения от величины радиуса сопряжения формообразующей поверхности с отверстием под стержень болта

Результаты расчетов скорости изнашивания в зависимости от уровня эквивалентных напряжений в зоне радиуса сопряжения формообразующих поверхностей и величины радиуса представлены в табл. 1.

Табл. 1

Скорость изнашивания рабочей поверхности (V_r) в зависимости от радиуса сопряжения и напряженного состояния матриц третьего перехода для посадки болта М22×75

R (мм)	$\sigma_{экв}$ (МПа)	V_r (мм/тыс.циклов)
1,5	5300	0,052642
2	5190	0,050381
3	5027	0,040055
4	4410	0,024274
5	3650	0,007463

Если сопоставить результаты расчетов скоростей изнашивания при соответствующих эквивалентных напряжениях в зоне сопряжения формообразующих поверхностей, приведенных в табл. 1, получим зависимость 4, отражающую влияние напряженного состояния на скорость изнашивания гравюры (рис. 6).

$$V_r = 0,0001e^{0,0012\sigma_{\text{экв}}} [\text{мм/тыс.циклов}], \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – величина эквивалентных напряжений, МПа.

Как видно из приведенного графика, более высокой износостойкостью должны обладать матрицы, на рабочей поверхности которых возникают эквивалентные напряжения не более 2000 МПа. В то же время, при изготовлении матриц даже с предельно возможным радиусом порядка 5 мм эквивалентные напряжения достигнут значения 3650 МПа, а скорость изнашивания составит порядка 0,007463 мм/тыс. циклов. Очевидно, что в этой ситуации после изготовления первых нескольких тысяч изделий величина радиуса превысит предельное значение, и геометрия получаемого изделия не будет соответствовать требованиям чертежа. Вероятность того, что износ поверхности инструмента будет происходить равномерно, низка. Это обусловлено тем, что изготовление матриц с радиусом сопряжения формообразующих поверхностей порядка 5 мм практически не изменяет характера распределения эквивалентных напряжений по рабочей поверхности инструмента (рис. 2 б).



Рис. 6. Зависимость скорости изнашивания рабочей поверхности матриц от величины эквивалентных напряжений

Для дальнейшего уменьшения величины эквивалентных напряжений произвели дополнительные изменения формообразующей поверхности штампа. Учитывая, что окончательная обработка граней головки болтов происходит на четвертом переходе (обсекание облоя), корректировку рабочей поверхности матриц осуществили на боковых участках, формирующих облой.

В указанных зонах изготовлены разгружающие камеры в виде цилиндрических лысок (рис. 1 в). Изменение формы гравюры матриц позволило более равномерно распределить эквивалентные напряжения по рабочей поверхности матриц (рис. 2 в), максимальная величина которых снижена в 1,5–2 раза (рис. 7). В зоне радиуса сопряжения формообразующей поверхности с отверстием под стержень болта величина эквивалентных напряжений составляет порядка 2300 МПа и незначительно отличается от напряженного состояния близлежащих участков гравюры штампа. Согласно модели изнашивания данного типа инструмента (рис. 6, зависимость 4) скорость изнашивания формообразующих поверхностей в наиболее нагруженных зонах снижена и имеет близкие значения (табл. 2).

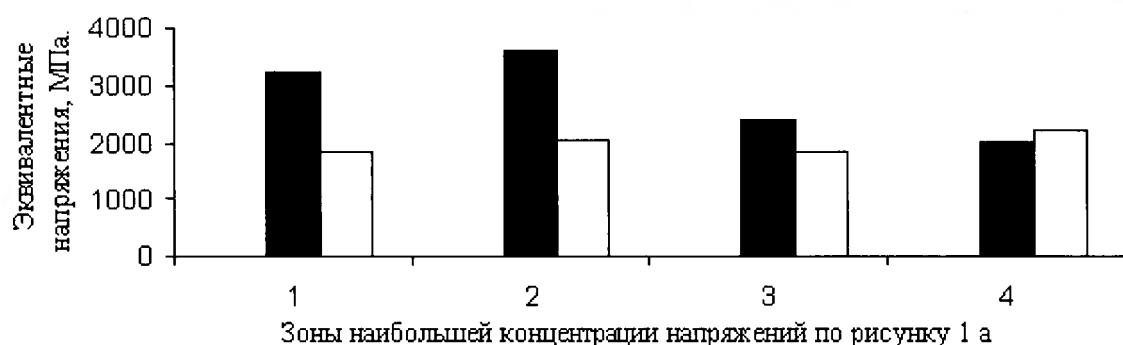


Рис. 7. Величина эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных зонах рабочей поверхности:

■ $\sigma_{\text{экв}}$ для матрицы без разгружающих камер;
□ $\sigma_{\text{экв}}$ для матрицы с разгружающими камерами

Табл. 2

Износостойкость матриц без разгружающих камер и с ними.

Обозначение зоны по рис. 1 а	Эквивалентные напряжения, МПа		Скорость изнашивания, мм/тыс.циклов	
	без разгружающих камер	с разгружающими камерами	без разгружающих камер	с разгружающими камерами
1	3220	1830	0,004766	0,000899
2	3620	2060	0,007701	0,001185
3	2410	1830	0,001803	0,000899
4	2010	2229	0,001116	0,001451

Экспериментальная проверка показала, что изнашивание ручья матриц с разгружающими камерами и радиусом сопряжения формообразующей поверхности порядка 5 мм происходит без возникновения очагов повышенного износа (рис. 1 в). По мере увеличения числа высаженных деталей рабочая полость матрицы углубляется без изменения своей первоначальной геометрической формы. Стойкость инструмента повышена в 1,8–2 раза.

Заключение

Анализ напряженного состояния матриц для посадки головки болта железнодорожного крепежа М22-8g×75.36 ГОСТ 16017-79 показал, что в результате локальной перегрузки гравюры инструмента величина эквивалентных напряжений на отдельных участках формообразующей поверхности может достигать 5000 МПа и более. Изнашивание поверхностного слоя в этом случае происходит в результате развития усталостных процессов. Мониторинг изнашивания инструмента в зоне радиуса сопряжения в сопоставлении с напряженным состоянием позволил определить зависимость скорости износа от величины эквивалентных напряжений. Показано, что для снижения вероятности катастрофического развития процессов контактной усталости величина эквивалентных напряжений не должна превышать 2000–2500 МПа. Комплексная модернизация гравюры матриц позволила выполнить указанную рекомендацию, что обеспечило повышение стойкости матриц в 1,8–2 раза.

Список использованных источников

1. Попов, В.А. Холодная посадка металлов / В.А.Попов. – М.: МАШГИЗ, 1955. – 100 с.
2. Биллигман, И. Высадка и другие методы штамповки / И.Биллигман. – М.: МАШГИЗ, 1960. – 468с.
3. Мисоужников, В.М., Технология холодной посадки металлов / В.М. Мисоужников, М.Я. Гринберг

М.Я.– М.: МАШГИЗ, 1951. – 308 с.

4. Nélías, D. Role of inclusions, surface roughness and operating conditions on rolling contact fatigue. D. Nélías, M.L. Dumont, F. Champiot, A. Vincent, D. Girodin / *Journal of Tribology, ASME*. 1999. V.121(2). P. 240–251.

5. Beheshti, A. On the prediction of fatigue crack initiation in rolling/sliding contacts with provision for loading sequence effect / A. Beheshti, M.M. Khonsari // *Tribology International*. 2011. V.44. p. 1620–1628.

6. Рыжов, Н.М. Технологическое обеспечение сопротивления контактной усталости цементуемых зубчатых колес из теплостойких сталей / Н.М. Рыжов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. №6. С. 39–45.

7. Chen, L. Study on initiation and propagation angles of subsurface cracks in GCr15 bearing steel under rollingcontact / L. Chen, Q. Chen, E. Shao. *Wear*, 1989. V. 133(2). P. 205–218.

8. Fajdiga, G. Pitting formation due to surface and subsurface initiated fatigue crack growth in contacting mechanical elements / G. Fajdiga, S. Glodez, J. Kramar. *Wear*, 2007. V. 262(9-10) P. 1217–1224.

9. Кенько, В.М. Комплексный учет факторов, определяющих стойкость холодновысадочной оснастки / В.М. Кенько, И.Н. Степанкин. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2006. № 2. С. 39–46.

10. Кремнев, Л.С. Особенности разрушения инструментальных материалов / Л.С. Кремнев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1994. № 4. С. 17–22.

11. Семенов, М.Ю. Анализ способов упрочнения зубчатых колес из теплостойких сталей на основе расчетного метода / М.Ю. Семенов, И.Н. Гаврилин, М.Ю. Рыжова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. №1. С. 42–46.

12. Трахтенберг, Б.Ф. Стойкость штампов и пути её повышения / Б.Ф.Трахтенберг. – Куйбышевское книжное издательство, 1964.– 280 с.

13. Геллер Ю.А. Инструментальные стали: Справочник.– М.: Металлургия, 1984.– 584 с.

Статья поступила в редакцию 21.04.2015