



ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАПЛАВКЕ НА ЗАКРЕПЛЕНИЕ ЦАПФ В КОРПУСЕ МЕЛЬНИЦЫ

В. А. КОРОТКОВ

Нижнетагильский технологич. ин-т (филиал) УрФУ. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59.

E-mail: vk@udgz.ru

Наружные поверхности цапф мельниц по переработке сырья подвержены интенсивному износу от трения в подшипниках. Износ уменьшает толщину цапф. В совокупности с остаточными растягивающими напряжениями от наружной восстановительной наплавки это может привести к образованию продольных трещин. Предложено восстановление прочности цапф путем наплавки их по внутренней поверхности. При этом достигается эффект закрепления цапф, заключающийся в том, что отрицательные остаточные напряжения уменьшают рабочие напряжения и позволяют полым цилиндрам выдерживать более высокие нагрузки. Расчетный анализ и экспериментальная проверка напряженного состояния, образующегося при наплавке цапфы мельницы по внутренней поверхности, показал, что на наружной поверхности цапфы образуются остаточные напряжения сжатия, существенные по величине и создающие автоскрепляющий эффект, повышающий сопротивляемость цапф образованию трещин от рабочих нагрузок. Библиогр. 8, рис. 3.

Ключевые слова: наплавка, остаточные напряжения, цапфы мельниц

Торцевые стенки мельниц (МСЦ 3,6×4,5 и др.) представляют собой диск с впрессованной в него цапфой. При эксплуатации диск изнашивается в местах примыкания к бочке мельницы в результате проникновения пульпы под уплотнения, а цапфы — по наружной поверхности от трения в подшипниках. ООО «Композит» в конце 1990 годов освоил их восстановление наплавкой [1]. Диск наплавляли сначала «мягкой» сталью, чтобы не иметь затруднений при механообработке, а после проточки с занижением на 3 мм — «в размер» твердым сплавом для увеличения износостойкости. Цапфы наплавляли сварочным полуавтоматом (рис. 1) и протачивали до чертежного размера. Было восстановлено более 50 шт. торцевых стенок для Качканарского и Высокогорского ГОКов, Среднеуральского и Красноуральского медеплавильных заводов с экономией около 1 млн руб. на каждом изделии.

Восстановление существенно, примерно в 2 раза, продлило срок службы торцевых стенок, во время которого происходило увеличение износа внутренней поверхности цапф, контактирующих с загрузочными патрубками. На некоторых цапфах он достиг 20 мм. Износ уменьшает толщину цапф и, как следствие, увеличивает рабочие напряжения, которые в совокупности с остаточными растягивающими напряжениями в наружной наплавке способствуют образованию продольных трещин. За последние два года было выявлено около 10 шт. цапф, имеющих трещины в наружной поверхности, некоторые из которых превра-

тились в сквозные. Таким образом, существует необходимость в увеличении прочности восстановленных цапф мельниц.

Очевидной мерой по восстановлению прочности является наплавка цапф по внутренней поверхности. При этом наплавка, соразмерная износу (20 мм), представляется невозможной из-за вероятной усадки цапфы и потери прочности ее закрепления (прессовой посадки) в торцевой стенке. Наплавка более тонкого слоя (около 5 мм), во избежание усадки, на первый взгляд, не выглядит оправданной, так как не дает полного восстановления поперечного сечения цапфы, а следовательно, и полного восстановления прочности. Но отношение к ней может измениться, если рассмотреть возможность сопутствующего автоскрепления цапф сварочными напряжениями. Эффект автоскрепления заключается в том, что остаточные напряжения противоположного знака, т. е. уменьшающие рабочие напряжения, позволяют полым цилиндрам выдерживать более высокие, прилагаемые к ним, нагрузки [2, 3]. Применительно к данному случаю повысить сопротивление образованию продольных трещин могут остаточные окружные напряжения сжатия на наружной поверхности цапф. Возможность их наведения от наплавки по внутренней поверхности исследована в настоящей работе.

Анализ остаточных напряжений, образующихся при наплавке цапф мельниц по внутренней поверхности. Остаточные напряжения при сварке (наплавке) образуются в результате тепловой усадки нагретого металла, представляющего собой наплавленный металл и часть зоны

термического влияния (ЗТВ) в основном металле, получившую пластическую деформацию сжатия при нагреве [4–6]. Схема образования остаточных напряжений в цапфе с наплавкой по внутренней поверхности приведена на рис. 2. Из рисунка видно, что внутренняя часть 1 в результате тепловой усадки увлекает за собой наружную часть 2, создавая в ней окружные напряжения сжатия G_r . Формула для окружных напряжений в упругой области произвольно выбранного полого цилиндра ($a \leq r \leq b$), согласно данным работы [7], имеет вид:

$$G_r(r) = \frac{G_r(b)b^2(r^2 + a^2) - G_r(a)a^2(b^2 + r^2)}{(b^2 - a^2)r^2}. \quad (1)$$

Запишем выражение (1) для наружной поверхности ($r = b$) части 2 при следующих условиях:

- наружная поверхность, являясь свободной, радиальных напряжений не имеет ($G_r(b) = 0$);
- на нижней границе части 2 ($r = d$) действуют радиальные напряжения $G_r(d) = p$:

$$G_r(b) = -G_r(d) \frac{2d^2}{b^2 - d^2}, \quad (2)$$

где $G_r(b)$ — окружные напряжения на наружной поверхности ($r = b$) цапфы; $G_r(d)$ — радиальные напряжения на радиусе ($r = d$).

Поскольку радиальные напряжения в полых цилиндрах многократно меньше окружных, то говорить об автоскрепляющем влиянии внутренней наплавки имеет смысл лишь при условии $\frac{2d^2}{b^2 - d^2} \geq 1$, выполняющимся при условии

$$d \geq 0,6b. \quad (3)$$

Для нахождения радиуса $r = d$ примем во внимание, что он располагается внутри ЗТВ от на-

лавки. В работах [4–6] показано, что в зависимости от условий сварочного нагрева и жесткости детали граница пластического сжатия располагается в диапазоне изотерм 100...600 °С. С целью сокращения расчетов можно опустить из рассмотрения ЗТВ и полагать, что силовое воздействие на наружную часть втулки оказывает только наплавленный металл. В конечном счете это приближение уменьшает вероятность того, что расчетное автоскрепление не подтвердится в действительности. Тогда значение радиуса d находится из выражения $d = a + h$, где a — радиус внутренней (изношенной) поверхности втулки до наплавки; $h = 4$ мм — глубина проплавления при токе наплавки 400 А (из расчета 1 мм на каждые 100 А сварочного тока [8]).

Применительно к цапфе (рис. 1) с размерами $b = 675$ мм, $a = 578$ мм значение радиуса d , на котором создаются радиальные напряжения, вызывающие автоскрепление цапфы, составляет: $d = (578 + 10) + 4 = 592$ мм, где 10 (мм) — глубина износа цапфы по внутренней поверхности.

Таким образом, условие (4) выполняется: $592 > 0,6 \cdot 675 = 405$, что означает возможность появления от однослойной внутренней наплавки значимых по величине окружных сжимающих напряжений на наружной поверхности. Это, в свою очередь, показывает, что внутренняя наплавка сопровождается автоскреплением цапф и может способствовать предупреждению появления трещин на их наружной поверхности при эксплуатации.

Для оценки тепловых радиальных напряжений при $r = d$ применена формула из работы [9]:

$$G_r(r) = \frac{\alpha E}{r^2} \left[\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T(r) r dr - \int_a^r T(r) r dr \right]. \quad (4)$$

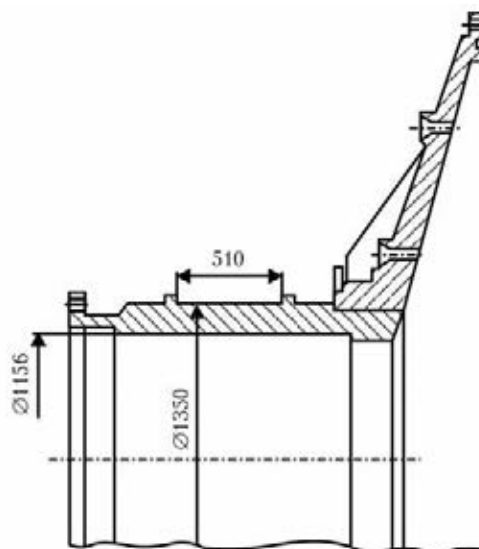


Рис. 1. Наплавка цапфы мельницы сварочным полуавтоматом и эскиз цапфы

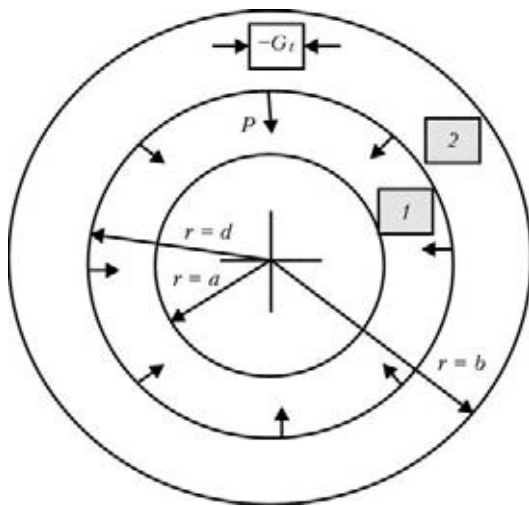


Рис. 2. Схема образования остаточных напряжений сжатия в наружной части цапфы при наплавке ее внутренней поверхности: 1 — зона наплавленного металла и высокотемпературного участка ЗТВ; 2 — зона наружной части цапфы; P (стрелки) — направления силового воздействия внутренней части 1 на наружную часть цапфы 2

Расчеты по ней выполнены со следующими допущениями:

при $T < 600$ °C предел текучести материала постоянен ($G_T = \text{const}$);

при $T > 600$ °C предел текучести материала пренебрежимо мал ($G_T = 0$);

остывание наплавленного слоя происходит за счет теплообмена с окружающей средой, т. е. часть 2 на рис. 2 температуру не повышает, что означает:

$T(a) = T(d-) = -600$ °C, где $T(d-)$ — температура на границе наплавки с внутренней стороны;

$T(d+) = T(b) = 0$ °C, где $T(d+)$ — температура на границе наплавки с наружной стороны;

знак минус означает, что тепловые напряжения возникают при понижении температуры.

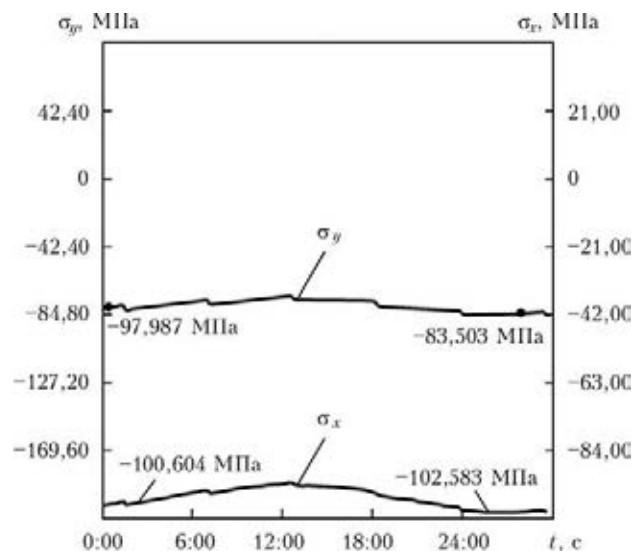


Рис. 3. Оциллограммы остаточных напряжений: σ_y — в направлении Y (осевые); σ_x — в направлении X (окружные)

Принятые допущения не являются оригинальными, подобные применялись в названных выше работах по сварочным напряжениям и деформациям. С их учетом выражение (6) принимает вид:

$$G_r(d) = -600\alpha E \left[\frac{(d^2 - a^2)(d^2 - a^2)}{2(b^2 - a^2)d^2} - \frac{d^2 - a^2}{2d^2} \right]. \quad (5)$$

Уменьшаемое в квадратных скобках в формуле (5) существенно меньше вычитаемого, что позволяет его опустить из рассмотрения. Тогда радиальные напряжения при $r = d$ находятся из выражения

$$G_r(d) = 600 \alpha E \frac{d^2 - a^2}{2d^2}, \quad (6)$$

где $\alpha = 14 \cdot 10^{-6}$ 1/°C — коэффициент линейного расширения; $E = 1,5 \cdot 10^5$ МПа — модуль упругости; значения радиусов a, d приведены выше.

Вычисления по формуле (6) показывают, что радиальные напряжения на границе пластических деформаций, создающие окружные автоскрепляющие напряжения на наружной поверхности цапфы при наплавке, равны $G_r(d) \approx 29$ МПа.

Подставляя это значение в выражение (2) получаем остаточные окружные напряжения на наружной поверхности цапфы $G_t(b) \approx -168$ МПа.

Можно отметить их сопоставимость с пределом текучести (270 МПа) материала цапфы (сталь 35Л) и на основе этого сделать вывод о существенном автоскрепляющем эффекте, сопровождающем наплавку цапф по внутренней поверхности.

Экспериментальная проверка расчета. Проводили однослойную наплавку сварочным полуавтоматом на внутреннюю поверхность цапфы мельницы по технологии, аналогичной наплавке наружной поверхности.

Предварительно на наружную поверхность цапфы приклеивали тарированные рабочие датчики в окружном и осевом направлениях (для компенсационных датчиков приваривали пластины). В качестве датчиков использовали тензорезисторы типа ФКПА 10-100, имеющие длину базы 10 мм и сопротивлением 91,6...92,0 Ом. Усилители сигнала, модули подключения датчиков и программное обеспечение КСКWin использованы от разработчика и изготовителя измерительной системы ЗАО «Теплоэнергетические технологии».

После сборки тензометрической цепи, но до наплавки цапфы по внутренней поверхности, проводили балансировку измерительных сигналов с датчиков (установка «0»). Перед наплавкой аппаратуру отключали, а после ее выполнения снова подключали и регистрировали значения напряжений в окружном и осевом направлениях. Результаты измерений представлены на рис. 3. Видно, что остаточные напряжения на наружной повер-

хности цапфы являются сжимающими. В окружном направлении они находятся на уровне 90, а в продольном 80 МПа.

Эксперимент подтвердил расчетный прогноз появления на наружной поверхности цапфы сжимающих напряжений. Экспериментальные значения оказались вдвое ниже расчетных (подобная точность характерна для расчетов при сварке), но при этом они составляют порядка 30 % предела текучести материала цапф (сталь 35Л; $\sigma_{0,2} = 270$ МПа) и поэтому могут рассматриваться как существенный фактор, повышающий сопротивление образованию трещин при эксплуатации. Таким образом, наплавка внутренней поверхности цапф способна одновременно восстанавливать ее износ (от контакта с загрузочным патрубком) и выполнять скрепляющую роль, увеличивая сопротивление цапф рабочим нагрузкам.

В заключение следует отметить, что расчетный анализ и экспериментальная проверка напряженного состояния, образующегося при наплавке цапфы мельницы по внутренней поверхности, показал, что на наружной поверхности цапфы образуются ос-

таточные напряжения сжатия, существенные по величине и создающие автозакрепляющий эффект, повышающий сопротивляемость цапф образованию трещин от рабочих нагрузок.

1. *Коротков В. А., Замотин В. А.* Восстановление деталей горного оборудования // Горный ж. — 2001. — № 8. — С. 53–56.
2. *Смирнов-Аляев Г. А.* Теория автоскрепления цилиндров. — М.: Оборонгиз, 1940. — 286 с.
3. *Регулирование* прочности прессовых соединений при наличии остаточных напряжений. // Изв. вузов. Машиностроение. — 1971. — № 8. — С. 29–33.
4. *Бакин О. А.* Деформации и напряжения при местном нагреве стального листа // Автоген. дело. — 1953. — № 2. — С. 1–6.
5. *Тальнов Г. П.* Приближенная теория сварочных деформаций и напряжений. — Изд-во ЛГУ, 1957. — 207 с.
6. *Коротков В. А., Трошин О. В., Феофанова В. А.* Исследование термдеформаций втулок при поверхностном нагреве. В 2-х сообщениях. // Изв. вузов. Машиностроение. — 1996. — № 10–12. — С. 90–98; 1997. — № 1–3. — С. 96–103.
7. *Илюшин А. А., Огибалов П. М.* Упругопластические деформации полых цилиндров. — М.: Изд-во МГУ, 1960. — 226 с.
8. *Справочник сварщика* / Под ред. В. В. Степанова. — М.: Машиностроение, 1975. — 520 с.

Поступила в редакцию 26.06.2013

НОВЫЕ КНИГИ

СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ / Составители: В.М. Илюшенко, Е. П. Лукьянченко. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 396 с. Мягкий переплет, 165x235 мм.

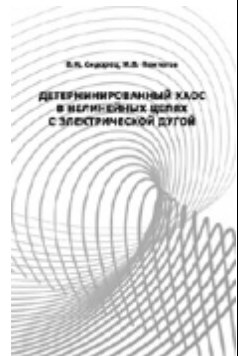
Сборник включает основные публикации — статьи, доклады, информационные материалы и изобретения в области сварки и наплавки меди и ее сплавов за период с 1953 по 2013 г., авторами которых являлись в основном сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В представленных материалах освещен широкий круг вопросов разработки прогрессивных технологических процессов сварки и наплавки этих материалов и опыт их промышленного применения в различных отраслях промышленности.

Сборник может быть полезен инженерно-техническим работникам сварочного производства, а также специалистам, развивающим исследования в этой области.



ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ. В. Н. Сидорец, И.В. Пентегов. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 272 с. Твердый переплет, 165x235 мм.

Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы. Рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем, а также аспирантов и студентов.



По вопросам заказов на книги просьба обращаться в редакцию журнала «Автоматическая сварка». Тел.: 200-54-84.