

К.Л. Кузнецов, А.А. Шеков

**ВЛИЯНИЕ ТОКОВ ПЕРЕГРУЗКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ
СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА В ЗОНАХ РАЗРУШЕНИЙ
МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ**

В статье проведен металлографический анализ зон оплавления медных жил, образующихся при токовых перегрузках. Рассмотрено влияние токов перегрузки на структуру оплавлений.

Ключевые слова: токовые перегрузки, медные проводники, металлографический анализ, судебная пожарно-техническая экспертиза

K.L. Kuznetsov, A.A. Shekov

**EFFECT OF OVERLOAD CURRENTS ON THE METAL
STRUCTURE FORMATION IN THE DESTRUCTION OF COPPER
CONDUCTORS**

The metalgraphic analysis of sites of melting of copper electric wires is carried out. Influence of currents of an overload on structure of oplavleniye is considered.

Keywords: electrical overloads, copper wire, metallographic analysis, forensic fire-technical examination

В последние годы в условиях непрерывного развития науки и техники растет число новых электроприборов высокой мощности, используемых в повседневной жизни людей. Это увеличивает потребление электроэнергии в расчете на человека и приводит к скрытому развитию аварийного режима работы электросети в виде токовых перегрузок.

Протекание по проводам сверхтоков, вызванных токовой перегрузкой, при отсутствии или неисправности аппаратов защиты может сопровождаться нагревом проводников до температуры самовоспламенения изоляции и (или) расположенных вблизи горючих материалов [4, 5]. В этих случаях на жилах проводников возникают протяженные участки поверхностного оплавления с характерными зонами утолщений и утончений, имеющих сходство с последствиями внешнего теплового воздействия [1]. Таким образом, нередко после пожара эксперту необходимо определить природу имеющихся на токоведущих жилах повреждений, в частности, отличить результат протекания аварийного процесса в электросети от последствий внешнего термического [3].

В работе для проведения исследования использовали медные одножильные проводники в поливинилхлоридной изоляции сечением 0,5 мм², 0,75 мм², 1 мм².

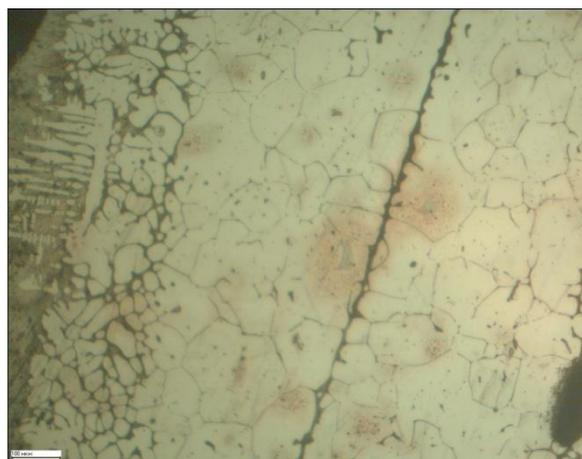
Перегрузку электрической сети имитировали в нормальных условиях окружающей среды с помощью нагрузочного трансформатора электросварочного аппарата «BestWeld PR300» при силе тока 65А, 80А, 150А, 200А, 300А. Проводники длиной 30 см закреплялись на весу зажимами электросварочного аппарата.

Металлографические шлифы образцов готовили с использованием шлифовально-полировального станка «Шлиф-2М-V». Травление поверхности шлифов осуществлялось протиранием ватным тампоном, пропитанным раствором хлорного железа в соляной кислоте. Исследование микроструктуры проводилось на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ-21.

При анализе структуры микрошлифов медных проводников сечением 1мм^2 (рис. 1) установлено, что во всех образцах основу сплава составляет медь (на фото светлые участки). При силе тока 65А, 80А и 150А на поверхности и по границам зерен меди наблюдается небольшое количество смеси меди и оксида меди ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$) – эвтектики, наличие газовых пор и участков с дендритным строением. Часть микроструктуры представлена зернами меди, имеющими равноосную структуру (структуру равномерной кристаллизации при высокой температуре). На основании этих данных можно сделать вывод о наличии в месте оплавления микроструктуры сплава с признаками, формирующимися при протекании аварийного режима работы электросети как в нормальных условиях окружающей среды, так и в условиях повышенных температур.



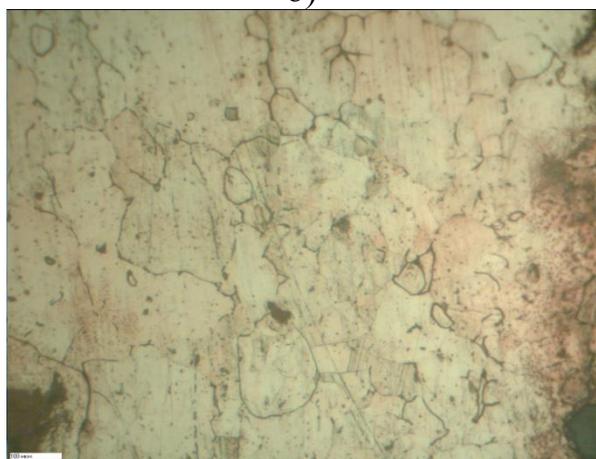
а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Микроструктуры шлифов медных проводников сечением 1мм^2 , полученных при токах перегрузки: а) 65А; б) 80А; в) 150А; г) 200А; д) 300А

При силе тока 200А на поверхности и по краям зерен меди наблюдается незначительное количество смеси меди и оксида меди – эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зерна меди имеют равноосную структуру, газовые поры. Подобная структура металла формируется в условиях высоких температур и пониженного содержания кислорода, т.е. в условиях пожара.

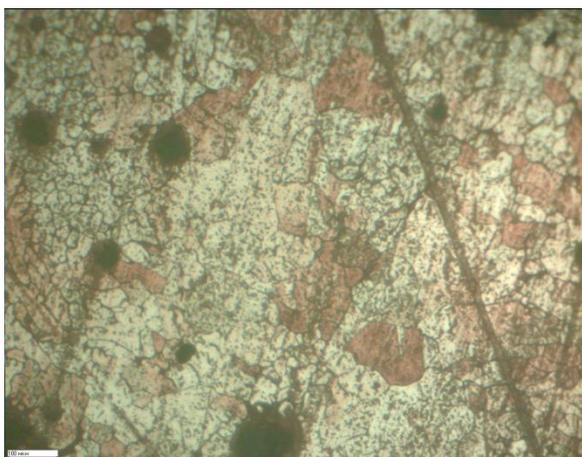
При силе тока 300А на поверхности и по краям зерен меди наблюдается значительное количество смеси меди и оксида меди – эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зерна меди имеют дендритное строение, что характерно для аварийных режимов в нормальных условиях окружающей среды.

При анализе структуры микрошлифов медных проводников сечением $0,75\text{мм}^2$ (рис. 2) установлено, что во всех образцах основу сплава составляет медь (на фото светлые участки). При силе тока 65А, 80А и 150А на поверхности и по границам зерен меди присутствует оксид меди в виде эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), значительное количество сплава меди и оксида меди наблюдается при силе тока 65А. Также на всех образцах имеются участки с дендритным строением (шлиф сделан поперек дендритов). При силе тока 65А и 150А имеются газовые поры, при 80А – газовые поры отсутствуют. Часть микроструктуры представлена зернами меди, имеющими равноосную структуру. При силе тока 65А наблюдается видоизменение оксида меди и его коагуляция. На основании этих данных можно сделать вывод о наличии в месте оплавления микроструктуры сплава с признаками, формирующимися при протекании аварийного режима работы электросети как в нормальных условиях окружающей среды, так и в условиях повышенных температур.

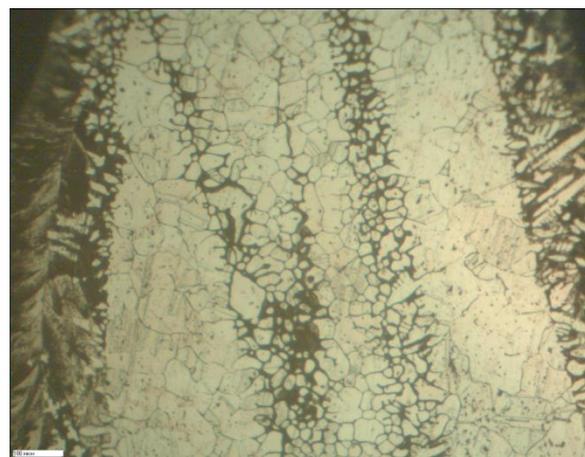
При силе тока 200А на поверхности и по краям зерен меди наблюдается небольшое количество смеси меди и оксида меди – эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зерна меди имеют равноосную структуру, имеются газовые поры. Подобная структура металла формируется в условиях высоких температур и пониженного содержания кислорода, т.е. в условиях пожара.

При силе тока 300А на поверхности и по краям зерен меди наблюдается большое количество смеси меди и оксида меди – эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зерна меди имеют дендритное строение, имеются газовые поры. Такое строение

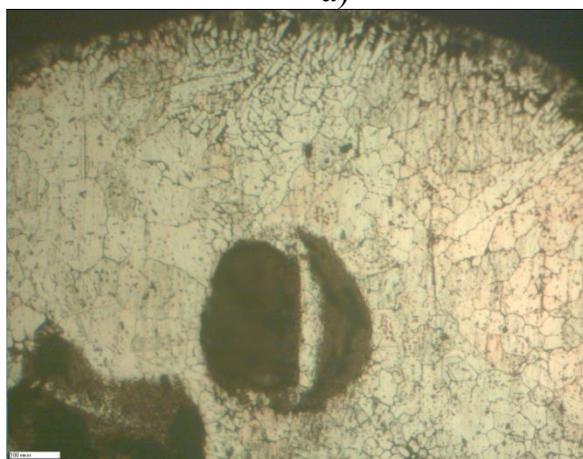
характерно для аварийных режимов в нормальных условиях окружающей среды.



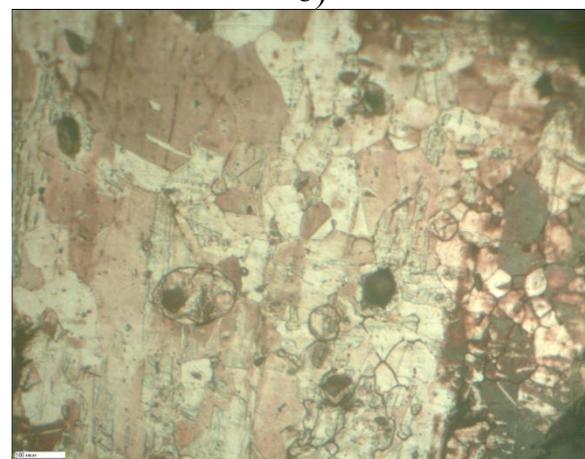
а)



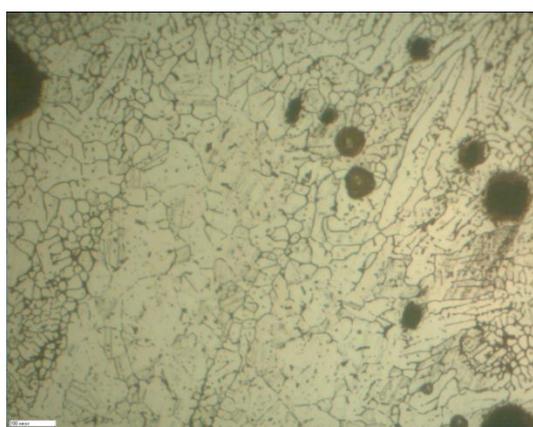
б)



в)



г)



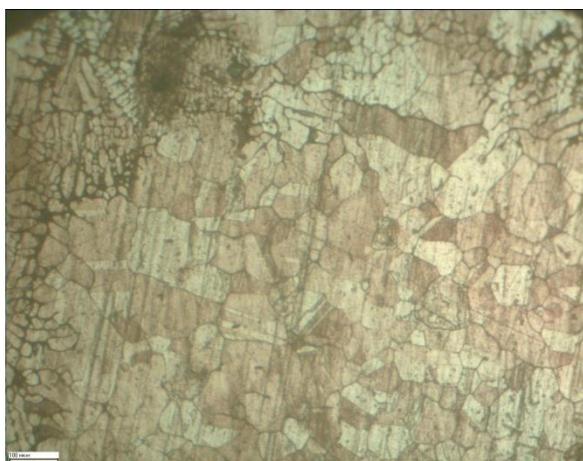
д)

Рис. 2. Микроструктуры шлифов медных проводников сечением $0,75\text{мм}^2$, полученных при токах перегрузки: а) 65А; б) 80А; в) 150А; г) 200А; д) 300А

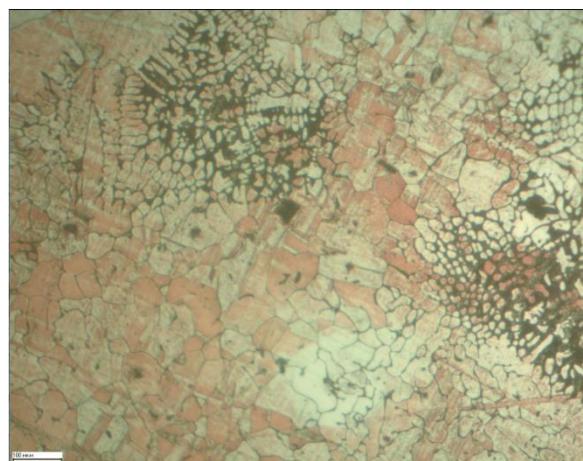
При анализе структуры микрошлифов медных проводников сечением $0,5\text{ мм}^2$ (рис. 3) установлено, что во всех образцах основу сплава составляет медь (на фото светлые участки). При силе тока 65А и 80А на поверхности и по границам зерен меди наблюдается небольшое количество смеси меди и оксида

меди – эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), наличие газовых пор и участков с дендритным строением (шлиф сделан поперек дендритов). Часть микроструктуры представлена зернами меди, имеющими равноосную структуру. При силе тока 65А наблюдается видоизменение частиц оксида меди и их коагуляция. На основании этих данных можно сделать вывод о наличии в месте оплавления микроструктуры сплава с признаками, формирующимися при протекании аварийного режима работы электросети как в нормальных условиях окружающей среды, так и в условиях повышенных температур.

При силе тока 150А на поверхности и по краям зерен меди наблюдается небольшое количество смеси меди и оксида меди – эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зерна меди имеют равноосную структуру, газовые поры. Подобная структура металла формируется в условиях высоких температур и пониженного содержания кислорода, т.е. в условиях пожара.



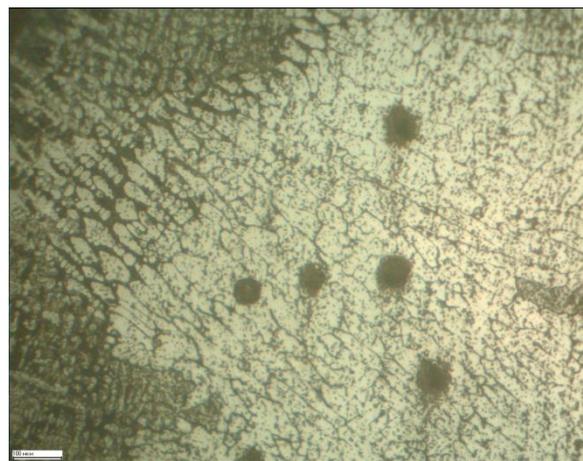
а)



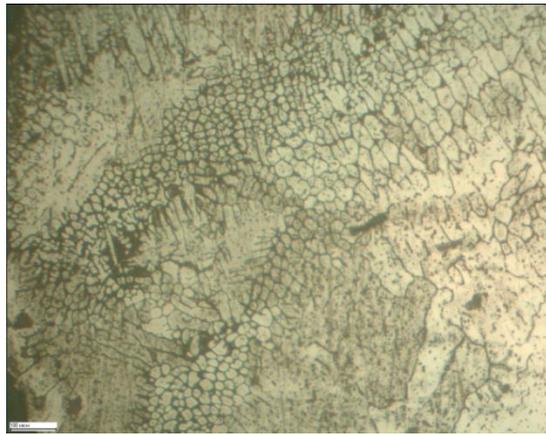
б)



в)



г)



д)

Рис. 3. Микроструктуры шлифов медных проводников сечением $0,5\text{мм}^2$, полученных при токах перегрузки: а) 65А; б) 80А; в) 150А; г) 200А; д) 300А

При силе тока 200А и 300А на поверхности и по краям зерен меди наблюдается большое количество смеси меди и оксида меди – эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$), зерна меди имеют дендритное строение (шлиф сделан поперек дендритов), газовые поры. Такое строение характерно для аварийных режимов в нормальных условиях окружающей среды.

Как видно, структура металла в зоне оплавления медного проводника зависит от тока перегрузки, величина которого влияет на интенсивность и особенности прогрева медного проводника, а также разрушения и воспламенения его изоляции.

В результате исследования зон оплавлений медных проводников установлено:

– при силе тока 65 А, 80 А и 150 А (кроме проводника сечением $0,5\text{мм}^2$) шлифы зон оплавлений проводников имеют микроструктуры металла, схожие со структурами, формируемыми при коротком замыкании электропроводки как в нормальных условиях окружающей среды, так и в условиях пожара;

– зоны оплавлений проводников сечением $0,5\text{мм}^2$, образованные при силе тока 150 А, и сечением $0,75\text{мм}^2$ и 1мм^2 , образованные при силе тока 200 А, имеют микроструктуры металла, схожие со структурами, формируемыми при коротком замыкании электропроводки в условиях пожара;

– зоны оплавлений проводников сечением $0,5\text{мм}^2$, образованные при силе тока 200 А и 300 А, и сечением $0,75\text{мм}^2$ и 1мм^2 , образованные при силе тока 300 А, имеют микроструктуры металла, схожие со структурами, формируемыми при коротком замыкании электропроводки в нормальных условиях окружающей среды.

Таким образом, при перегрузке электрической сети в условиях нормальной окружающей среды, когда данный аварийный режим может послужить причиной пожара, в зоне оплавления возможно формирование структуры металла, схожей со структурой, формируемой при коротком замыкании электропроводки в условиях пожара. Данный феномен связан с влиянием величины токов перегрузки на интенсивность и особенности

прогрева медного проводника, а также разрушения и воспламенения его изоляции.

Известно, что изоляция провода может загореться только при токовой перегрузке, имеющей кратность выше определенного значения. Так, для кабеля с медной жилой сечением $0,5 \text{ мм}^2$ номинальная сила тока составляет 11 А, $0,75 \text{ мм}^2$ – 15 А, 1 мм^2 – 17 А. Следовательно, при кратности перегрузки медного проводника 11–14 в нормальных условиях окружающей среды возможно формирование структур, характерных для условий пожара. Для исключения ошибочных выводов по причине пожара экспертам в данном случае необходима информация о нагрузке электрической сети, т.е. о мощности потребителей электрической энергии.

В целом полученные данные согласуются с результатами работ [2, 6]. В работе [6] установлено, что при увеличении кратности перегрузки вытянутые структуры металла сменяют равноосные. В работе [2] отмечается, что зерна в оплавлениях при токовой перегрузке кратностью более 3–4 имеют различную форму (дендритные, вытянутые или равноосные) и ориентацию. При этом авторы отмечают, что при перегрузках кратностью менее 8–9 содержание кислорода в зоне оплавления варьируется от 0,10 до 0,39 % и более. При кратностях перегрузки более 8–9 концентрация кислорода в большей части объема оплавления остается на уровне – 0,05 %. Таким образом, в данных работах не рассматривается переход от равноосной формы зерен в оплавлении к смешанной при токах перегрузки кратностью более 11–14.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Мокряк А.Ю., Чешко И.Д., Пеньков В.В. Морфологический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4 (32). С. 41–49.
2. Мокряк А.Ю., Чешко И.Д. Металлографический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки при экспертизе пожаров // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2014. № 4. С. 51–58.
3. Чешко И.Д., Мокряк А.Ю., Скодтаев С.В. Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. № 1. С. 41–46.
4. Ling-zi Li, Jin-zhuan Zhang. Study on Ignition Capability of Overloaded Wire to the Wool Fabric // Procedia Engineering. 2016. V. 135. P. 220–226.
5. Ying Wu. Research on Overload Ignition Characteristic of Copper Wire // Advanced Materials Research. 2013. V. 740. P 511–516.
6. Zhang J.Z. Impaction of overload time and multiple of current on the microstructure of copper wire // Fire Science and Technology. 2009. N. 7. P. 543–545.