

应用所需：通过 IGBT 模块的优化连接技术延长混合动力客车逆变器的寿命

作者：Wilhelm Rusche，工程学硕士（FH），英飞凌科技股份有限公司

Martin Helsper 博士，西门子股份有限公司

Niklas Rüger 博士，西门子股份有限公司

Sandra Krasel，物理学硕士，英飞凌科技股份有限公司

Yilmaz Koray，理科硕士，英飞凌科技股份有限公司

Niels Oeschler 博士，英飞凌科技股份有限公司

本文介绍的研究目标在于寻找合适的解决方案以提高功率模块上焊接系统的耐用性/可靠性，并在现有的设计上予以实现。通过加速的可靠性试验，如被动热循环（TC）和热冲击试验（TST）来评估改进的焊接连接的可靠性。文中将展示因施加的负载不同而导致的焊接层老化情况差异，以及对失效机理的影响。通过分析声学扫描显微镜（SAM）图像进行结果对比。研究的重点在于可靠性以及元件中采用的改进接合技术在延长混合动力客车的逆变器的系统寿命方面的作用。寿命的计算基于真实的牵引循环，测量对象为带有液体冷却系统的串联式混合动力驱动的城市客车的逆变器。

简介

串联式混合动力驱动的城市客车电力推进系统将显著降低燃料消耗和 CO₂ 排放。基本的拓扑结构和此类系统的主要部件如图 1 所示^[1]。

相较于乘用车，客车对额定功率要求更高，从而需求更高的直流母线电压。通常情况下，此类应用中采用改进型工业 1200V IGBT 功率模块和附加的工业元件。在此应用中，逆变

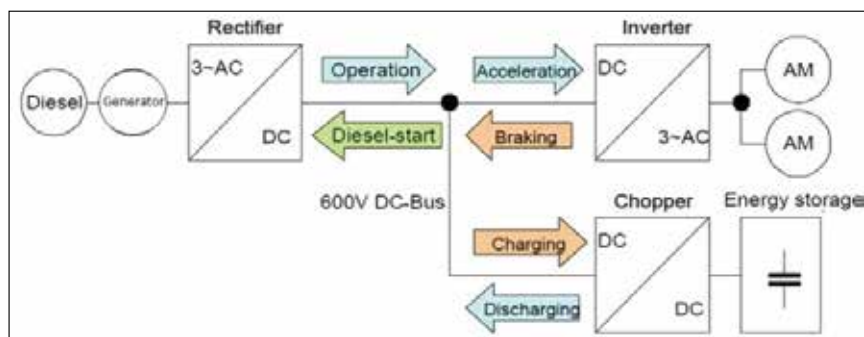


图1：串联式混合动力驱动的基本拓扑结构

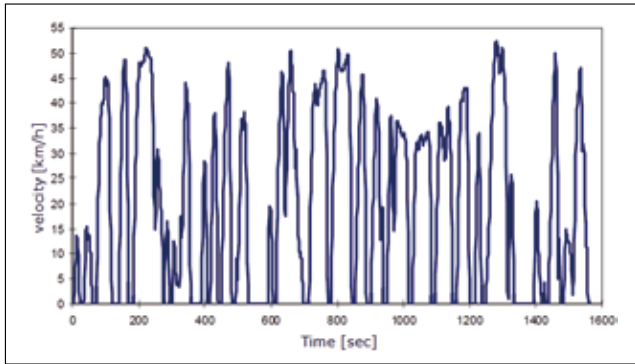


图2: 城市客车牵引工况示例

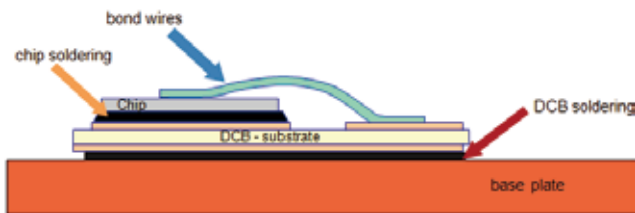


图3: 功率模块的一般结构

器产生的 IGBT 模块功率损耗是混合动力城市客车负载型态的结果。图 1 中的箭头表示取决于客车运行工况的能量流。若客车处于正常工况中, 能量从柴油发动机开始, 通过整流器、逆变器和电气机械 (AM) 流向车轮。若客车处于加速中, 储能装置支持驱动, 然后放电。在刹车情况下, 能量通过逆变器和斩波器流入储能装置。

以下研究重点放在逆变器上。在驾驶或加速情况下, 逆变器中的能量主要由流过 IGBT。若客车正在刹车, 能量将主要流过逆变器的续流二极管 (FWD)。12 米长城市客车的工况示例见图 2^[1]。

在给定负载和模块运行条件下且逆变器处于工作中时, 可以如^[2]所述从功率半导体接合层的老化效应来估计其寿命。然而, 在城市客车的日常运行中, 逆变器尤其是逆变器的功率电子元件必须承受极高的电气、机械负载和巨大的热负载。进而言之, 所有的设备必须能够无故障运行 60,000 小时才能实现商用车辆 (CAV) 的经济性要求。其要求远高于乘用车应用。

功率模块

功率元件的长期可靠性, 即其寿命通常通过芯片热应力和外壳温度进行定义。如^[3,4]中发表所述, 这两个温度是由工况和芯片与冷却系统之间的热传递共同决定的结果。

IGBT 功率模块是逆变器功率电子的核心元件。功率模块的一般结构如图 3 所示。

芯片、IGBT 和续流二极管 (FWD) 焊接于衬底。衬

底的基础材料为基于氧化铝 (Al_2O_3) 的陶瓷, 其两面会进行金属化。铜是现在进行金属化最通用的材料 (DCB 衬底)。对于标准工业模块, DCB 衬底通过无铅焊接工艺焊接至厚度为 3 毫米的铜基板。这些热传导层皆具有瞬态和稳态热阻抗的特性。基板同时也在水平轴上具有热传导作用。使用 FEM 模拟 (有限元模拟) 计算带有基板和不带基板的功率模块的主动散热面积。对比结果如图 4 所示。带有基板的模块由于增大了散热面积, 具备更好的散热性能。

1. 功率模块上的功率循环和热循环效应

带基板的模块不仅具有更大的散热面积, 而且还对最终结温具有巨大的影响, 对于结温波动 ΔT_j 影响更大。两者均对芯片焊接和芯片顶部的铝键合线的热机械应变有影响^[5]。带基板和不带基板的功率模块的模拟结温 (T_j) 对比如图 5 所示。动态负载循环结果显示带有基板的模块结温摆动幅度明显较低。

由于键合线的功率循环 (PC) 失效机理与结温摆动 ΔT_j 直接相关, 为了减少结温波动, 建议采用带基板的模块。详细结果论述见^[3]和^[4]。此外, 本文中讨论英飞凌的基于 1200V IGBT4 的功率模块已被认为具备一流的技术和一流的功率循环性能^[6,7]。

基于前文阐释的带基板模块功率循环可靠性结果的优点, DCB 与铜基板之间焊料层就理所当然的成为下一个进行改善的目标。焊接材料具有不同的热膨胀系数 (CTE)。应用中产生的温度变化和不同的 CTE 导致这个连接的热负载。该负载导致 DCB 焊料层内部产生热机械应变。由周期性应变引起的焊料疲劳将最终导致焊料内部裂纹扩散^[8]。模块在高动态负载下的承受能力取决于这些半导体模块中连接层的耐用性。

2. 改进型功率模块

耐用性需求的日益提高推动了更耐用的工业 IGBT 模块接合技术的发展, 以满足商用车辆应用的技术和经济性要求。基于现有的用于混合动力客车的逆变器设计 Elfa®2^[1], 本文选择 EconoDUAL™3 封装作进一步研究以改进 DCB 系统焊接。该试件采用改进型 DCB 焊接。这一

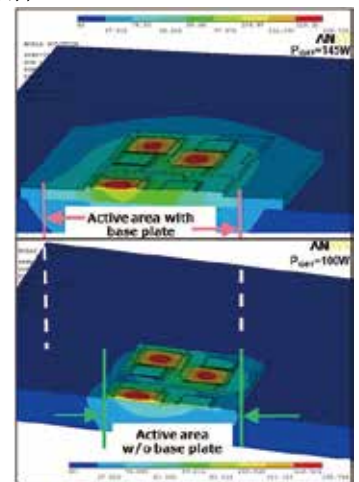


图4: 带基板和不带基板的功率模块散热模拟结果

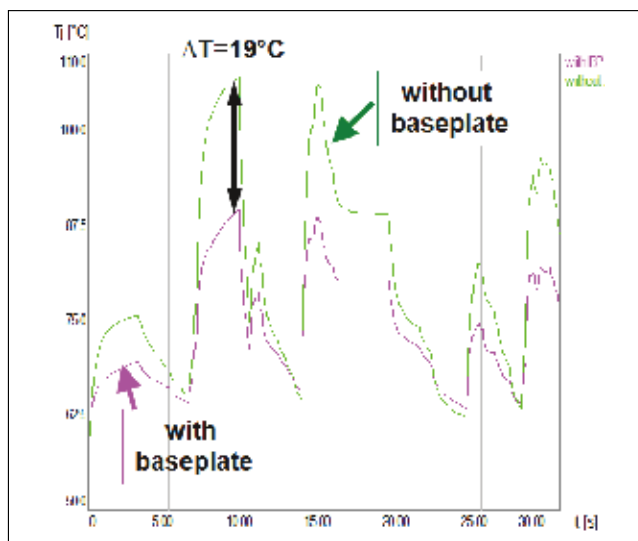


图5: 带基板和不带基板的功率模块的模拟 IGBT 结温



图6: EconoDUAL™ 3 的典型外观

全新的接合技术可认为是对英飞凌即将推出的 .XT 接合技术的选择性提取^[10]。为进一步研究而选择的此封装的典型外观如图 6 所示。

试验配置和结果

在评估 DCB 系统焊接可靠性时，常用的方法是进行加速试验。加速因子用于将试验时间和试验条件转换为目标运行条件下的等效运行时间。加速试验中最重要的方面是失效机理在加速试验中不能变化。被动热冲击试验 (TST) 根据 IEC60068-2-14 进行，被动热循环 (TC) 试验根据英飞凌用于产品检验的 QRP，选择这两个试验目的是评估 DCB 系统焊接的疲劳。通过应用不同的时间间隔 (Δt) 和不同的温度变化 (ΔT)，两个试验均引起被测元件 (DUT) 的焊料层热机械应变。

1. 热冲击试验

热冲击试验是一种引起热机械应变的快速试验，不仅用于 DCB 焊料层，也用于功率半导体模块的所有元件。使用带有不同温度的两个实验箱。模块放置于两个实验箱中并达到明确规定的时间，目的是确保温度达到稳定状态。将被测元件放置于第一个实验箱中，温度下限值为 $T_{\min} = -40^{\circ}\text{C}$ ，典型存放时间为 $t_{\text{storage}} = 1$ 小时。经过此时间后，元件通过一个升降系统转移至第二个实验箱，转移时间为 $t_{\text{transport}} < 30$ 秒。被测元件在第二个

实验箱内放置 1 小时，温度上限为 $T_{\max} = 125^{\circ}\text{C}$ 。被测元件随后被送回第一个实验箱并放置相同时间。 T_{\min} 加上 T_{\max} (2 小时) 所得的总持续时间即为一个 TST 循环。在本次热冲击试验中，元件必须承受巨大的温差—— $\Delta T = 165\text{K}$ 。标准工业中等功率元件的循环次数为 $N_{\text{cyc}} = 50$ 次。若电气参数和结到元件外壳的热传导性能保持在试验规范的限值之内，则证明功率元件通过了试验。

3. 热冲击试验结果

在第一步中，根据英飞凌的汽车认证标准，对带有改进的系统焊接的原型的试验次数达到 $N_{\text{cyc}} = 1000$ 次，并在 500 次循环后进行一次中间读数。试件、系统和芯片焊接层在循环次数为 $N_{\text{cyc}} = 0$ ， $N_{\text{cyc}} = 500$ 和 $N_{\text{cyc}} = 1000$ 次时的 SAM 图像如图 7 所示。在这些 SAM 图像中，几乎看不出分层。此外，模块的塑料外壳及其注模金属部件在承受巨大的热应力之后未发现任何损坏。所有的电气参数，尤其是结到外壳的热传导性能均处于试验规范的限值之内。因此，这些原型通过了 TST 试验，循环次数为 $N_{\text{cyc}} = 1000$ 次。

基于这些非常具有前景的结果，TST 持续进行至循环次数为 $N_{\text{cyc}} = 2000$ 次，并分别在循环次数为 $N_{\text{cyc}} = 1500$ ， $N_{\text{cyc}} = 1750$ 和 $N_{\text{cyc}} = 2000$ 次时读取，研究重点在于改进的 DCB 焊料层的分层现象。图 8 显示 DCB 焊接在循环次数为 $N_{\text{cyc}} = 1000$ 和 $N_{\text{cyc}} = 2000$ 次时的图像。当循环次数持续进行到 2000 次时，两个 DCB 之间和 DCB 的边角^[8]出现了轻微的分层，在图 8 中以圆圈包括显示。但是由于分层极小，不会影响芯片到壳的热传导能力。

2. 热循环试验

其他原型通过被动热循环试验 (TC) 进行研究。在此研究中，试验持续进行直至被测元件寿命终结 (EOL)。DCB 焊接的寿命估算可通过 EOL 结果和实际应用的工况进行推断。

TC 试验在被动外部加热和外部冷却装置中进行。在此被动装置下，被测元件安装于一个加热/冷却板

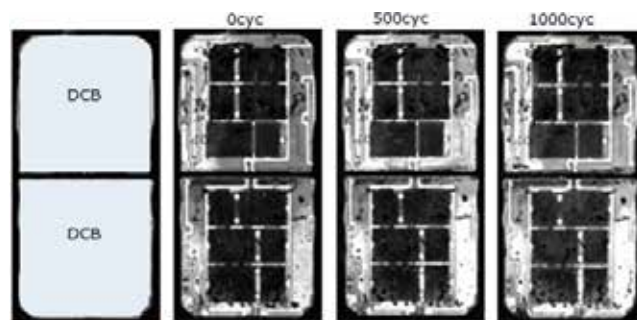


图7: TST 循环次数达到以下值时的 DCB 原型焊接 SAM 图像: $N_{\text{cyc}} = 0$, $N_{\text{cyc}} = 500$ 和 $N_{\text{cyc}} = 1000$ 次

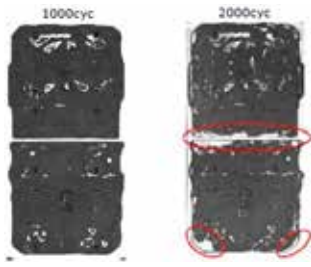
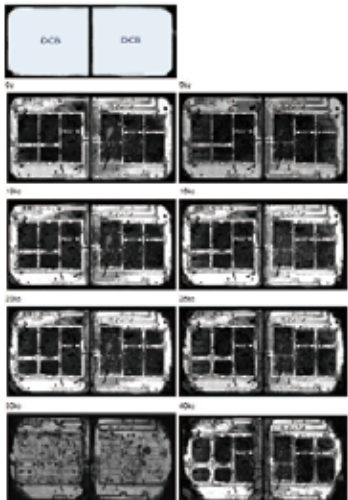


图8: TST 循环次数达到以下值时的 DCB 原型焊接 SAM 图像: $N_{cyc}=1000$ 和 $N_{cyc}=2000$ 次。

上, 热负载通过这一外部板从基板均匀地引导至系统焊料。对基板均匀施加的温度循环从 $T_{c_min}=25^{\circ}\text{C}$ 开始, 以 $\Delta T_c=80\text{K}$ 为梯度, 逐渐升高至 $T_{c_max}=105^{\circ}\text{C}$ 。该装置可冷却至 $T_{c_min}=25^{\circ}\text{C}$ 。完整循环时间约为 $t_{cyc}=6$ 分钟。若电气参数和结与元件外壳之间的热传导性能保持在试验规范的限值之内, 则证明功率元件通过了试验。芯片和 DCB 焊料层的 SAM 图像如图 9 所示。第一批 SAM 图像显示的是循环次数为 $N_{cyc}=0$ 次时的初始状态; 每经过 $N_{cyc}=5000$ 次循环便读取一次, 最后显示的是循环次数达到 $N_{cyc}=40000$ 次的图像。此检查涵盖焊料层、芯片和 DCB, 但重点在于改进型 DCB 焊接层的分层。

DCB 焊接层的分层从 DCB 边缘开始。但是, 在循环次数为 $N_{cyc}=25000$ 次之前, 分层并未达到芯片。25000 次循环后, 分层才到达芯片的边缘——甚至在 30000 次循环之后, 芯片下的分层面积极可忽略不计。分层面积极随着循环次数的增加而增大。40000 次循环后的结果检查显示, 系统焊料和芯片焊料层的分层面积极总和会对结与外壳之间的热传导性能产生影响。基于试验规范, 分层面积极总和达到了元件的 EOL。模块达到其 EOL 时, 试验停止。最终, 原型通过了循环次数达到 $N_{cyc}=30000$ 次的被动热循环试验。此外, 研究了 30000 次循环后的结壳热阻 R_{thjc} , 目的是确定芯片区域下方分层的影响。结果非常好, 所有值均在规范限值之内。

由于温度均匀地引导至整个基板区域, 被动 TC 的



热机械应力水平高于主动 TC (主动 TC 与 PC 试验具有可比性, 但仅限于分钟级的循环时间下), 因为在主动 TC 下温度是局部的在芯片周围进行升高。标准工业 EconoDUAL™

图9: TST 循环次数达到以下值时的 DCB 原型焊接 SAM 图像: $N_{cyc}=0$ 次, 每隔 $N_{cyc}=5000$ 次, $N_{cyc}=40000$ 次

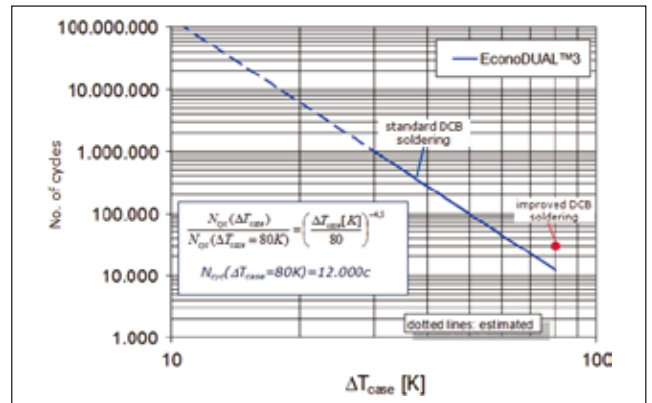


图10: 标准 EconoDUAL™ 3 模块的热循环性能

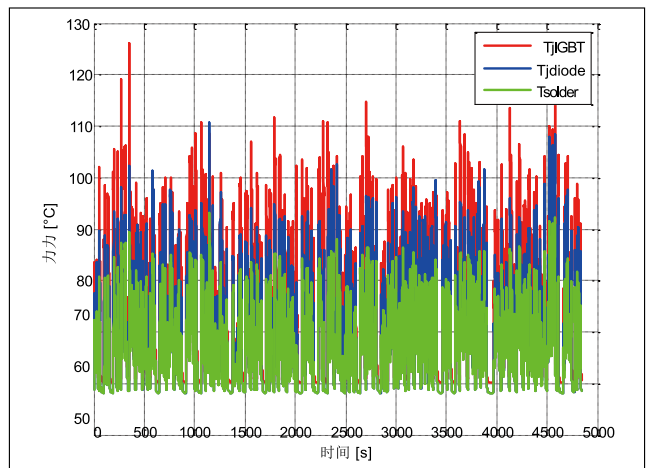


图11: 基于逆变器运行条件下的一个循环所计算的温度

3 的主动热循环性能为 $T_{c_min}=25^{\circ}\text{C}$ 时 $N_{cyc}=12000$ 次, $\Delta T_c=80\text{K}$, 如图 10 所示^[9]。

如图所示, 带有改进的系统焊接的模块被动 TC 可靠性具有明显提升。

对于改进的功率模块, 作为第一个保守假设, 在 $N_{cyc}=30000$ 次, $\Delta T_{case}=80\text{K}$ 时的第一个 TC 循环改进结果用于线性近似, 从而可与图 10 中给出的标准 DCB 焊接在完整的 ΔT_{case} 范围内进行对比, 以此进行寿命估算和对比。

在实现新焊料接合技术后, 英飞凌将发布一个最终的延长热循环 (TC) 规范。

寿命估算

运行逆变器的要求为 15 年内 60,000 小时, 即约等于每天运行 11 小时。此运行时间内的车辆行驶距离为 1,000,000 公里^[1]。

为获得如图 1 所示的逆变器的实际寿命估算, 以下寿命估算基于串联式混合动力客车实际应用中采集的的负

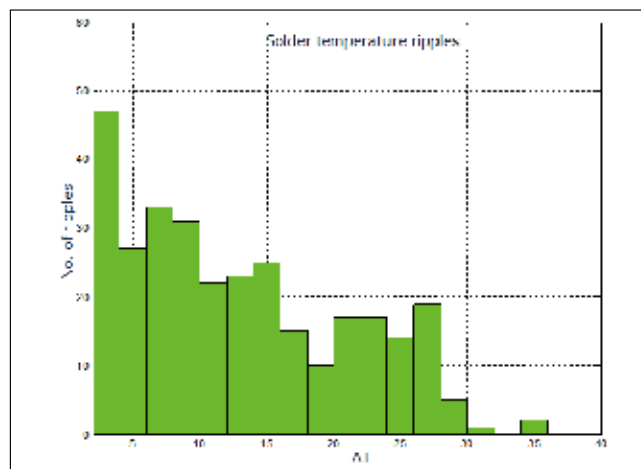


图11: 基于逆变器运行条件下的一个循环所计算的温度

表1 标准 EconoDUAL™ 3 中的 DCB 焊料寿命的近似值

每日运行时长	1.35	6	11
可达寿命年限	67	14.9	8.4

表2: 改进的 EconoDUAL™ 3 中 DCB 焊料寿命的近似值

每日运行时长	1.35	11	15
可达寿命年限	167.5	20.9	15.2

载循环进行。

通常，在牵引的工况下，IGBT比同一模块中的续流二极管承受的应力更大。因此，寿命估算重点在于逆变器处于正常运行条件下 IGBT 的 DCB 焊接方面。

此真实采集的工况的行程持续时间为 $t_{\text{driving}}=4800$ 秒。功率元件和焊料层的结果温度基于逆变器的运行条件进行计算。

IGBT结温 (T_{jIGBT})，FWD 结温 (T_{jdiode}) 和 DCB 系统焊接温度 (T_{solder}) 是一个时间函数 $T=f(t)$ ，如图 11 所示。

对于 EconoDUAL™ 3 采用雨流算法对已计算所得的温度进行分离和读数，如图 11 所示。DCB焊料层的温度波动 (ΔT_{solder}) 结果显示于图 12。

对于 EconoDUAL™ 3，与 TC 性能相结合，估算的焊料寿命如表 1 所示。标准模块的寿命估算结果显示，此模块用于已测量的牵引循环时，每天运行 11 小时，可持续运行 8.4 年。与要求相比，这是有限制的。在真实的应用中，必须通过降额来保证寿命。但是这些措施会对变频器是有负面影响的。

改进的 EconoDUAL™ 3 模块在焊料连接耐用性方面具有显著的提高。其寿命取决每天的运行小时数，如表 2 所示。带有改进的焊接系统的模块符合 60,000 小时的要求。每天运行 11 小时，可持续运行接近 21 年。即使每天运行小时数增加至 15 小时，也可达到 15 年的寿命目标。

因此，通过采用新颖的焊料和相关的工艺来替代传统的焊料技术可将模块的寿命增加至两倍以上。

结论与展望

本文提出了一种新的解决方案以增加 DCB 至基板连接的耐用性。通过加速的可靠性试验，如被动热循环 (TC) 和热冲击试验 (TST) 等来评估改进的焊料连接的可靠性。通过使用不同的焊料和相关工艺，试验过程中焊料层中产生的裂纹显著减少。

寿命估算结果显示寿命可延长两倍以上。对于现有的逆变器设计，改进型 DCB 焊料在符合城市客车混合动力驱动的全面要求方面具有显著优势。

基于所论述的改进，这种高可靠性的焊接将作为更高的标准在 EconoDUAL™ 3 功率模块中实现，以用于寿命要求更高的商用车辆应用。

这一全新的接合技术可认为是对英飞凌即将推出的 .XT 接合技术的选择性提取^[9]。

另外，全新的 EconoDUAL™ 3 将根据英飞凌 IGBT 模块的汽车标准进行认证。

www.infineon.com

参考资料

- [1] Dr. Helsper, Martin; Brendel, Bernd: Challenges for IGBT Modules in Hybrid Buses; EPE, Barcelona, 2009
- [2] Dr. Mainka, Krzysztof: Step by step methodology of device lifetime based on mission profile; ECPE; Dusseldorf, July 2013
- [3] Dr. Christmann, André; Dr. Mainka, Krzysztof: facing high thermal loads on power modules in hybrid electrical vehicles; PCIM; Nuremberg, May 2010
- [4] Luniewski, Piotr: System and Power Module Requirements for Commercial, Construction & Agriculture Vehicles; ECPE; Munich, 2009
- [5] Dr. Bayerer, Reinhold; et al.: Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules – various factors influencing lifetime; CIPS; Nuremberg, March 2008
- [6] Infineon Technologies AG – Application Note: AN2010-02 Use of Power Cycling Curves for IGBT4
- [7] Rusche, Wilhelm; Bäbler, Marco: 1200V IGBT4 Low and Medium Power – Chips designed to the needs of the application; Bodo's Power Systems; June 2007
- [8] Dr. Guth, Karsten; Mahnke, Peter: Improving the thermal cycling capability of Cu baseplate modules; CIPS; Naples, June 2006
- [9] Infineon Technologies Reliability Specification: Thermal Cycling (TC) Capability for Industrial modules (CU baseplates) rev.2, February 2012
- [10] Dr. Guth, Karsten; et al.: New assembly and interconnects beyond sintering methods; PCIM; Nuremberg, May 2010