

Title	ガラスのレーザスクライブにおける適正加工条件の推定と亀裂進展解析
Author(s)	八幡, 恵輔
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27587
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	八幡 恵輔
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 26251 号
学位授与年月日	平成25年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科ビジネスエンジニアリング専攻
学位論文名	ガラスのレーザスクライプにおける適正加工条件の推定と亀裂進展解析
論文審査委員	(主査) 教授 大村 悦二 (副査) 教授 上西 啓介 教授 伊東 一良 教授 片山 聖二 准教授 倉敷 哲生

論文内容の要旨

レーザスクライプは、加熱と冷却によって生じる熱応力を利用して分断の起点となる亀裂を形成する。加工線周辺にクラック(ダメージ)が生じない加工条件を用いれば高い端面強度が得られるため、携帯電話や薄型テレビに使用されるFPD用ガラス基板の分断に適している。生成する亀裂は、一般に、基板端付近と基板中央では亀裂深さが異なり、加工条件によっては深さ方向に湾曲する。そのため、適正加工条件の範囲を推定できるとともに、その条件下での亀裂深さや形状を予測できることは、生産加工において重要である。本研究では、レーザスクライプの信頼性と生産性の向上のため、まずダメージ発生メカニズムを明らかにした。また、亀裂進展解析により、基板中央および加工開始側基板端付近での亀裂深さ、および非対称応力場内で形成される湾曲した亀裂形状を予測できることを示した。以下に、各章の概要を示す。

第1章では、研究の背景および目的と意義について述べた。

第2章では、レーザ加熱によって大きな残留応力が生じると、ダメージを誘起する外部負荷のしきい値が低下することを明らかにした。実験的にはリタデーション測定によって解析的には最大せん断応力の調査によって、外部負荷によって発生するダメージまで考慮して適正加工条件を絞り込めることを示した。

第3章では、実用上最も重要な基板中央付近で形成される垂直亀裂を対象として二次元および三次元亀裂進展解析を行った。ここでは、応力拡大係数が設定したしきい値を超える領域で亀裂を進展させる、という方法を用いた。その結果、実験結果を踏まえて得られた適切なしきい値を用いれば、亀裂深さを推定できることを示した。準定常現象であるため、二次元解析の方が短時間で亀裂深さを推定でき、実用的であることも示した。

第4章では、亀裂が準定常的に進展するに至るまでの、加工開始側基板端付近での亀裂進展について、三次元亀裂進展解析によって検討した。基板端がレーザ加熱される際に基板内部にはたらく引張応力によって初期亀裂が貫通亀裂に至ること、その後の冷却時に基板表面近傍にはたらく引張応力によって、貫通亀裂の一部が進展して浅い表面亀裂が形成されることを示した。

第5章では、加熱域と冷却域がずれた場合の非対称応力場内で形成される湾曲した亀裂を対象として三次元亀裂進展解析を行った。非対称応力場内であっても亀裂が準定常的に進展することを明らかにし、これを利用して効率的に亀裂形状を求める方法を提案した。その結果、湾曲した亀裂の形状を比較的簡易に推定できることを示した。

第6章では、論文全体を総括した。

論文審査の結果の要旨

本論文は、フラットパネルディスプレイ用ガラス基板の分断工程に適用されているレーザスクライプについて、生産性と信頼性、端面品質のさらなる向上のため、適正加工条件を推定するとともに、亀裂深さと亀裂形状を予測することを目的として行われた一連の研究結果をまとめたものである。具体的には、(1) 製品化後の信頼性低下につながる誘導ダメージ発生メカニズムと適正加工条件の推定、(2) レーザスクライプで主となる基板中央付近の準定常亀裂進展に関わる線形破壊力学に基づいた亀裂進展解析による亀裂深さの推定、(3) 歩留まりに影響する加工開始側基板端付近の亀裂進展の過渡現象解析、(4) レーザビームとウォータジェットが加工線からずれることで亀裂が湾曲して、品質低下につながる場合のある、非対称応力場での亀裂進展メカニズムと亀裂形状の推定、という、生産加工上重要な四つのテーマを取り上げ、レーザスクライプ実験と亀裂進展解析を行っている。

(1)では、レーザスクライプ後に外部負荷を加えると生じるクラックを誘導ダメージと呼んで、レーザスクライプによって大きな残留応力が生じると、誘導ダメージを生じさせる外部負荷のしきい値が低下することを明らかにしている。実験的にはリタデーションを測定することによって、解析的には最大せん断応力を調べることによって、誘導ダメージが生じる加工条件を予測できることを示し、より信頼性の高い加工条件を絞り込めることを示している。

(2)~(4)では、レーザスクライプで観察されるさまざまな亀裂進展現象について、亀裂進展解析によってそのメカニズムを検討している。まず、基板中央付近で形成される準定常的な一定深さの亀裂を対象として、三次元亀裂進展解析を行っている。有限要素法と境界要素法を組み合わせることで、解析精度を維持して低コスト化を図っている。ここでは、応力拡大係数が設定したしきい値を超える領域で亀裂を進展させる、という手法を用いている。得られた亀裂深さを実験結果と比較して適切な応力拡大係数のしきい値を求めることで、レーザ出力や走査速度の異なる加工条件下での亀裂深さを推定できることを示している。この場合の亀裂進展現象は準定常であるため、二次元亀裂進展解析を行えば短時間で亀裂深さを推定でき、より実用的であることも実際に示している。

次に、上記三次元亀裂進展解析手法を加工開始側基板端付近での過渡現象解析に適用し、加工メカニズムを検討している。その結果、基板端がレーザ加熱される際に、基板内部にはたらく引張応力によって初期亀裂が貫通亀裂に至ること、その後の冷却時に、基板表面近傍にはたらく引張応力によって貫通亀裂の一部が進展し、浅い準定常的な表面亀裂に移行することを明らかにしている。さらに、加熱域と冷却域がずれた場合に断面形状が湾曲した亀裂が形成される現象についても、有限要素法と境界要素法を合わせた三次元亀裂進展解析を行っている。基板端から十分離れた位置では、湾曲した亀裂が準定常的に進展することを明らかにし、これを利用して、より少ない回数の繰り返し計算によって亀裂形状を求める解析手法を新たに提案している。加熱位置と冷却位置のずれ量の異なる複数の加工条件について、亀裂形状を実測し、解析結果と比較することで解析方法と結果の妥当性を示している。

本研究によって適正加工条件とさまざまな亀裂進展現象における亀裂形状を推定できるようになったことは、レーザスクライプの生産性と信頼性、端面品質のさらなる向上につながる。他の材料へのレーザスクライプの適用にも貢献が期待される。このように、本論文の一連の研究結果は学術面での独創性と完結性、ならびに工業的有用性が認められ、生産科学と生産加工の分野へ寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。